

## **Reparação e Otimização de Funções do Simulador Terco PST2200**

**NUNO FILIPE DA ROCHA MOTA E SILVA**

novembro de 2016

# REPARAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE FUNÇÕES DO SIMULADOR TERCO PST2200

Nuno Filipe Rocha Mota e Silva



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

8 de novembro de 2016



Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de  
DSEE - Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de  
Energia

Candidato: Nuno Filipe Rocha Mota e Silva, N° 1990633, 1990633@isep.ipp.pt

Orientação científica: Prof. Doutor Fernando Maurício Teixeira de Sousa Dias,  
fmd@isep.ipp.pt

Coorientação: Sr. Eng.º Armando Herculano Lopes Ferreira, ahlf@isep.ipp.pt



Departamento de Engenharia Eletrotécnica  
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

8 de novembro de 2016





## *Agradecimentos*

A realização de uma dissertação de Mestrado é uma tarefa que exige dedicação e sacrifício pessoal. Este trabalho assentou numa forte componente pratica. O trabalho pratico foi realizado nas instalações do ISEP, mais concretamente no Laboratório de Sistemas de Energia. Para atingir os objetivos propostos, os apoios que me foram prestados tiveram uma grande importância para superar as adversidades. Assim sendo, gostaria de prestar os meus sinceros agradecimentos ao ISEP e a todos os que contribuíram para a realização desta dissertação.

Um agradecimento especial ao orientador científico, o Professor Doutor Fernando Maurício Dias, pelo convite para a realização deste trabalho e, posteriormente, pelo seu apoio e colaboração sempre que necessário.

Ao coorientador, o Sr. Eng.º Armando Herculano Lopes pela sua disponibilidade.

Ao Diretor do Departamento de Engenharia Eletrotécnica, o Professor Doutor José António Beleza de Carvalho, um agradecimento especial pela sua ajuda na aquisição das peças de substituição e pelas suas recomendações.

Aos amigos Carlos Henrique Ferreira e Armandino Silva, pela ajuda prestada.

Aos meus pais, José Silva e Maria Perpétua, à minha família e amigos pelo apoio prestado.

## *Resumo*

A utilização de simuladores é atualmente uma das ferramentas mais usadas, tanto a nível académico como no mercado de trabalho. Ciente de tal facto, o Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), durante os anos 1990, adquiriu um simulador para o Laboratório de Sistemas de Energia, com a intenção de simular uma rede de produção, transporte, distribuição e consumo de energia elétrica. O objetivo era o de colocar os alunos do curso de Engenharia Eletrotécnica - Sistemas Elétricos de Energia o mais próximo possível da realidade encontrada no mercado de trabalho na área da energia elétrica.

Com o passar dos anos os problemas acumularam-se e, no decorrer dos últimos anos, o simulador deixou de ser usado. No início da segunda década deste século o equipamento foi alvo de uma intervenção, no âmbito de uma dissertação de mestrado, com sucesso. O simulador voltou a funcionar mas novas avarias sucederam-se, deixando-o inoperacional. Assim sendo, foi proposta uma nova dissertação com o objetivo de voltar a colocar o simulador a funcionar e de forma mais robusta.

Os passos a seguir passaram pela deteção das avarias que estavam a condicionar o bom funcionamento e pela substituição de todos os componentes avariados. A primeira etapa incidiu na verificação de todas as alimentações elétricas aos diversos componentes, tal como verificar se as fontes de alimentação estavam a fornecer a tensão pretendida, pois apesar deste simulador ser alimentado através de um sistema de três fases mais neutro (400 / 230 V) e frequência de 50 Hz, fornecidos diretamente pela rede de distribuição de energia elétrica, os diversos componentes que compõem esta máquina de simulação são alimentados com diversos níveis de tensão, o que obriga à utilização de fontes de alimentação com níveis de tensão que vão desde os 10 V aos 50 V em corrente contínua (CC).

O maior problema que o simulador apresentou estava relacionado com os contactores e com os blocos de contactos auxiliares. Apesar de eletricamente funcionarem, isto é, alimentando a bobina com 230 V em corrente alternada (CA) pelos contactos A1 e A2, atrai um núcleo móvel obrigando os contactos a fecharem ou a abrirem, conforme sejam contactos normalmente abertos (NA) ou normalmente fechados (NF). Os blocos de

contactos auxiliares, que estão anexados aos contactores e trabalham em sintonia com estes.

Devido aos contactores datarem do tempo em que o simulador foi construído, os contactos auxiliares internos construídos em metal, apresentavam sinais de oxidação, não permitindo o correto funcionamento. Após todos os contactores e todos os blocos de contactos auxiliares terem sido testados, chegou-se à conclusão de que a maior parte apresentava um funcionamento defeituoso e a solução encontrada foi a substituição total destes componentes.

Outros problemas foram detetados, como por exemplo, condutores desligados, botoneira de simulação do seccionador IE4 do painel C6 avariada e outros defeitos que vão ser referidos no capítulo dedicado a este assunto.

Como complemento ao trabalho executado, procedeu-se à elaboração de guiões para as manobras possíveis de serem executadas com o *hardware* disponível, as alterações que são exequíveis de serem feitas ao simulador, neste caso adicionando novos componentes propostos e, por último, alguns guiões de trabalhos propostos no âmbito das unidades curriculares da Licenciatura de Eletrotecnia - Sistemas Elétricos de Energia, dirigidos aos docentes.

### ***Palavras-Chave***

Simulador, manobras, produção, transporte, distribuição, energia elétrica, cargas.

## *Abstract*

The use of simulators is currently one of the most used tools, both academically and in the labour market. Aware of this fact, the "Instituto Superior de Engenharia do Porto" (ISEP), during the 1990s, acquired a simulator to the Power Systems Laboratory, with the intention of simulating a network of production, transport, distribution and consumption of electrical energy. The goal would be to put students of Electrotechnical - Electrical Power Systems as much as possible close to the reality found in the electrical power labour market.

Over the years the problems have accumulated, and over the past few years, the simulator is no longer used. At the beginning of the second decade of this century, the equipment was subject to an intervention as part of a master's dissertation, with successfully. The simulator returned to work but new damages succeeded. Therefore, it was proposed a new dissertation in order to replace the simulator to work.

The steps passed to the detection of faults that were to condition the smooth operation and replacement of all components detected as faulty. The first step went through verification of all power supplies to the various components, such as check if the power supplies were to provide the desired tension, because in spite of this simulator is supplied with three-phase voltage of 400 V with neutral, 50 Hz, supplied directly by distribution network electricity, the various components that make up this simulation machine are supplied with different voltage levels, which requires the use of power supplies with voltage levels ranging from 10 V to 50 V in direct current (DC).

The biggest problem that the simulator was presented with contactors and auxiliary contact blocks. Although electrical work, namely, feeding the coil with 230 V alternating current (AC) by A1 and A2 contacts, attracts a movable core forcing the contacts to close or open, as are normally open contacts (NO) or normally closed (NC). Auxiliary contact blocks, which are attached to the contactors, work in line with these.

Due to the contactors date from the time when the simulator was built, the internal auxiliary contacts constructed of metal, showed signs of oxidation, preventing proper operation. After all contactors and auxiliary contact blocks have been tested, came to

the conclusion that most had a malfunction and the solution was the total replacement of these components.

Other problems were detected, such as disconnected wires, switch of the simulator from panel IE4 damaged and other defects that will be mentioned in the chapter dedicated to this part.

As a complement to the work done, it proceeded to the execution of scripts for possible manoeuvres to be performed with the available hardware, the changes that are feasible to be made to the simulator, in this case adding new proposed components and, finally, some work guidelines proposed under the courses of degree of Electrotechnical - Electrical Energy Systems, directed to teachers.

### ***Key words***

Simulator, manoeuvres, production, transport, distribution, electrical energy, loads.

# Índice

<b>Agradecimentos .....</b>	<b>i</b>
<b>Resumo .....</b>	<b>ii</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>iv</b>
<b>Índice.....</b>	<b>vi</b>
<b>Índice de Figuras .....</b>	<b>viii</b>
<b>Siglas e Acrónimos.....</b>	<b>xi</b>
<b>Conceitos .....</b>	<b>xii</b>
<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO.....</b>	<b>2</b>
<b>2. Estado da Arte .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1 SIMULADORES POR <i>HARDWARE</i> .....</b>	<b>5</b>
<b>2.2 SIMULADORES POR <i>SOFTWARE</i> .....</b>	<b>8</b>
<b>2.3 APRESENTAÇÃO DO SIMULADOR TERCO DO LABORATÓRIO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DO ISEP.....</b>	<b>13</b>
<b>2.3.1 Documentação existente .....</b>	<b>13</b>
<b>2.3.2 Descrição dos Módulos .....</b>	<b>14</b>
<b>2.3.3 Descrição dos Painéis Frontais ... ..</b>	<b>21</b>
<b>2.4 RESUMO.....</b>	<b>34</b>
<b>3. Avaliação do estado inicial de funcionamento do simulador .....</b>	<b>37</b>
<b>3.1 DESCRIÇÃO DETALHADA DAS AVARIAS DETETADAS E ANÁLISE DE CAUSAS .....</b>	<b>37</b>
<b>3.2 CORREÇÕES E AÇÕES CORRETIVAS .....</b>	<b>43</b>
<b>3.3 RESUMO.....</b>	<b>47</b>
<b>4. Descrição das manobras .....</b>	<b>49</b>
<b>4.1 MANOBRAS POSSÍVEIS DE SEREM EXECUTADAS .....</b>	<b>51</b>
<b>4.2 MANOBRAS POSSÍVEIS DE SEREM EXECUTADAS APÓS ALTERAÇÕES AO SIMULADOR.....</b>	<b>56</b>
<b>4.3 OUTRAS ALTERAÇÕES PROPOSTAS AO SIMULADOR .....</b>	<b>58</b>

4.4	RESUMO.....	62
5.	Propostas de guíões para o Laboratório de Sistemas de Energia .....	63
5.1	GUIÃO "VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DO EFEITO <i>FERRANTI</i> " .....	63
5.2	GUIÃO " SISTEMA TRIFÁSICO COM CARGAS R, L E C " .....	64
5.3	GUIÃO " COMPENSAÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA NUM SISTEMA DE ENERGIA" ..	65
5.4	GUIÃO " MEDIÇÃO DAS COMPONENTES HARMÓNICAS DAS ONDAS DE CORRENTE E DE TENSÃO " .....	66
5.5	RESUMO.....	67
6.	Conclusões e trabalhos futuros .....	69
	Bibliografia.....	72
	Anexo A. Guião "Verificação experimental do Efeito <i>Ferranti</i> " .....	74
	Anexo B. Guião "Sistema trifásico com cargas R, L e C" .....	81
	Anexo C. Guião "Compensação do Fator de Potência num Sistema de Energia" ..	93
	Anexo D. Guião "Medição das componentes Harmónicas das ondas de corrente e de tensão" .....	105



## Índice de Figuras

Figura 1 - Simulador TERCO PST 2200 adquirido pelo ISEP.....	5
Figura 2 - Simulador PST 2200 atualmente em comercialização pela TERCO .....	6
Figura 3 - Simulador da marca LEYBOLD, existente no Laboratório de Sistemas de Energia, ISEP.....	7
Figura 4 - Modelo de Carga Resistiva: a) atualmente à venda, b) existente no Laboratório de Sistemas Elétricos, no ISEP. ....	8
Figura 5 - Exemplo de componentes integrantes do <i>Simscape Power Systems - Simulink</i> . ....	9
Figura 6 - Exemplo do ambiente gráfico do <i>PowerWorld</i> . ....	10
Figura 7 - Exemplo gráfico do simulador PSMS.....	10
Figura 8 - Programa de redes elétricas CYME. ....	11
Figura 9 - Exemplo gráfico do modelo unifilar do <i>software</i> da Siemens. ....	12
Figura 10 - Manuais existentes no laboratório. ....	13
Figura 11 - Capa do caderno que contém os esquemas elétricos existentes no laboratório.....	14
Figura 12 - Distribuição dos módulos do simulador TERCO PST2200.....	15
Figura 13 - Chapa de características a) do gerador b) do motor.....	15
Figura 14 - Chapa de características do transformador elevador. ....	16
Figura 15 - Grandezas das linhas dos painéis C4 e C5 a) 100 km, b) 20 km, c) 10 km e d) 5 km.....	18
Figura 16 - Chapa de características do transformador abaixador. ....	19
Figura 17 - Painel C1.....	23
Figura 18 - Painel C2.....	24
Figura 19 - Painel C3.....	25
Figura 20 - Painel C4.....	26
Figura 21 - Painel C5.....	27

<b>Figura 22 - Painel C6.....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 23 - Painel C7.....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 24 - Painel C8.....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 25 - Painel C9.....</b>	<b>33</b>
<b>Figura 26 - Painel C10.....</b>	<b>34</b>
<b>Figura 27 - Bloco de bornes de distribuição dos diversos níveis de tensão, painel C1. ....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 28 - Placa de medidas MM1, painel C1.....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 29 - Ligadores que foram alvo de intervenção no equipamento de sincronismo, painel C2. ....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 30 - Ligadores que foram alvo de intervenção nos seccionadores S7 e S8, painel C6.....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 31 - Ligadores que foram alvo de intervenção nos seccionadores S7 e S8, painel C6.....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 32 - Seccionador alvo de troca, painel C8. ....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 33 - Acoplamento defeituoso entre o contactor e o bloco de contactos auxiliares. ....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 34 - Nova localização dos blocos de contactos no interior do módulo.....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 35 - Relé avariado da placa de controlo lógico PVAK22.....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 36 - Contactos internos em metal do contactor oxidados.....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 37 - Contactores e bloco de contactos auxiliares a) antigos b) novos. ....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 38 - Fonte de alimentação instalada no painel C2 para a alimentação individual da placa de controlo lógico. ....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 39 - Esquema unifilar da subestação elevadora do simulador.....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 40 - Esquema unifilar da subestação abaixadora (AT para MT) do simulador.....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 41 - Esquema unifilar da subestação elevadora do simulador, com os <i>by-pass</i> sugeridos.....</b>	<b>56</b>

<b>Figura 42 - Esquema unifilar da subestação abaixadora (AT para MT) do simulador, com os <i>by-pass</i> sugeridos.....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 43 - Instalação do seccionador de isolamento IS1 e do seccionador de <i>by-pass</i>. ....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 44 - Interligação das saídas 1 e 2.....</b>	<b>60</b>
<b>Figura 45 - Instalação dos dois seccionadores IS2 e IS3. ....</b>	<b>61</b>
<b>Figura 46 - Instalação dos dois seccionadores IS6 e IS7. ....</b>	<b>61</b>
<b>Figura 47 - Instalação de um seccionador por cada saída: IS4 e IS5. ....</b>	<b>62</b>
<b>Figura 48 - Representação de uma linha. ....</b>	<b>63</b>

## *Siglas e Acrónimos*

AT	-	Alta Tensão
BT	-	Baixa Tensão
CA	-	Corrente Alternada
CC	-	Corrente Contínua
D	-	Disjuntor
EDP	-	Energias de Portugal
I	-	Intensidade de Corrente
MAT	-	Muito Alta Tensão
MT	-	Média Tensão
NA	-	Normalmente Aberto
NF	-	Normalmente Fechado
R	-	Resistência
S	-	Seccionador
SEE	-	Sistemas Elétricos de Energia
TI	-	Transformador de Corrente
U	-	Tensão
Z	-	Impedância

## Conceitos

Para uma apresentação mais clara do que se vai descrever sobre o equipamento em estudo, vai ser feita uma breve descrição dos principais componentes que fazem parte do simulador.

- Gerador: Máquina elétrica que transforma energia mecânica em energia elétrica. No caso em estudo, a energia mecânica é fornecida por um motor assíncrono, acoplado ao veio do gerador. [1]
- Transformador: É uma máquina elétrica estática. O seu princípio de funcionamento é baseado na Lei de Faraday ou Lei da Indução magnética que afirma que o valor da tensão induzida numa espira é proporcional à razão da variação das linhas de força que circulam nessa espira. Este absorve energia elétrica através de um enrolamento e fornece-a, transformada, por um ou mais enrolamentos, isolados eletricamente do primeiro enrolamento. Podem ser monofásicos ou trifásicos, colocados sobre um circuito magnético comum. A razão das tensões na entrada e da saída do transformador (razão de transformação -  $m$ ) é aproximadamente igual à razão do número efetivo de espiras ( $a$ ) dos respetivos enrolamentos. Estando a máquina em carga, a razão de transformação anterior é aproximadamente igual à razão inversa das correntes originando potências aparentes aproximadamente iguais, embora tenha-se de ter em atenção o tipo de ligação, como por exemplo Dy (triângulo - estrela) em que  $a = \sqrt{3} * m$ . [2]
- Disjuntor: É um aparelho mecânico de ligação capaz de estabelecer, de suportar e de interromper correntes nas condições normais do circuito. É ainda capaz de estabelecer, de suportar num tempo especificado e de interromper correntes em condições anormais especificadas para o circuito, tais como correntes de curto-circuito. [3]
- Seccionador: É um aparelho destinado a interromper ou estabelecer a continuidade de um condutor ou a isolá-lo de outros condutores e que, sem poder de corte garantido, não deve ser manobrado em carga. Quando utilizado para garantir a proteção de pessoas, a separação dos contactos deve ser visível e facilmente verificável do local de manobra ou outro. [4]

- Subestação: De acordo com [5] o Decreto de Lei Nº 42895 de 31-03-1960, define-se subestação como:  
*“Instalação de alta tensão destinada a algum ou alguns dos fins seguintes:*  
*a) Transformação da corrente elétrica por um ou mais transformadores estáticos, quando o secundário de um ou mais desses transformadores se destine a alimentar postos de transformação ou outras subestações;*  
*b) Transformação da corrente por retificadores, onduladores, conversores ou máquinas conjugadas;*  
*c) Compensação do fator de potência por compensadores síncronos ou condensadores.”*
- Barramentos: É um sistema de barras coletoras e repartidoras que assegura a ligação das diversas chegadas de energia elétrica e das várias linhas de saída pela qual a energia elétrica é conduzida para outras instalações. Quanto à sua configuração, existem barramentos simples e simples seccionável, duplo, duplo com conjugação de barras, duplo seccionável com conjugação de barras, duplo com barramento de transferência, barramento triplo, disjuntor e meio. [6]
- Rede Elétrica: é definida a rede elétrica como sendo o conjunto dos equipamentos e das instalações elétricas estruturadas de maneira a veicular a energia elétrica dos locais de produção até às instalações dos consumidores. [7]
- Rede de transporte: Pelo motivo das centrais de produção de energia elétrica estarem por norma afastadas dos centros de consumo, existe a necessidade de transportar a energia elétrica dos locais de produção para os locais de consumo: rede de transporte. No transporte, o nível de tensão é em muito alta tensão (MAT) e a alta tensão (AT). [8]
- Rede de Distribuição: Devido aos grandes centro de consumo de energia elétrica estarem, por norma, nos grandes centros urbanos, na proximidade destes existe a necessidade de utilizar tensões mais baixas do que na rede de transporte, assim surge a necessidade de mais uma etapa na cadeia da energia elétrica: a distribuição. Para a passagem da rede de transporte para a rede de distribuição é necessário a existência de subestações abaixadoras. [8]
- Cargas: No Sistema Elétrico de Energia uma "carga" é constituída por um componente ou conjunto de componentes que absorvem energia elétrica, sendo exemplos de cargas os motores, equipamentos eletrónicos, a iluminação, um

simulador, etc. Estas caracterizam-se pelo número de fases que as alimentam, monofásica ou trifásica e dependência em relação ao tempo. [9]

- Cargas resistivas: Uma carga diz-se resistiva quando a tensão ( $U$ ) aplicada à carga e a intensidade de corrente ( $I$ ) que o percorre estão em fase ( $\varphi = 0^\circ$ ) entre si. [10]
- Cargas capacitivas: Uma carga diz-se capacitiva quando a tensão aplicada à carga e a intensidade de corrente que a percorre estão desfasadas de um ângulo  $\varphi$  negativo tal que  $0^\circ > \varphi \geq -90^\circ$ , com a corrente avançada no tempo em relação à tensão. [10]
- Cargas indutivas: Uma carga diz-se indutiva quando a tensão aplicada à carga e a intensidade de corrente que a percorre estão desfasadas de um ângulo  $\varphi$  positivo tal que  $0^\circ < \varphi \leq 90^\circ$ , com a corrente atrasada no tempo em relação à tensão. [10]

# 1. Introdução

A utilização da simulação na formação oferece segurança e rentabilidade financeira, pois possibilita treinar em ambientes seguros e de confiança. Permite também poupar nas despesas causadas pelas simulações menos conseguidas, porque o que corre mal em ambiente simulado não causa danos no sistema real.

Atualmente, a simulação adquiriu um papel de grande importância para a atividade industrial em todos os setores, tal como na formação académica. Desenvolveram-se simuladores de processos industriais, na indústria elétrica, investimentos de capital, cirurgias, missões espaciais, etc. Cada vez mais, as empresas de todos os setores utilizam a simulação para executar a sua atividade já que permite conhecer antecipadamente o resultado de uma prática ou sistema antes de colocá-lo em funcionamento.

Sabendo da importância da simulação no sistema elétrico de energia, o ISEP adquiriu um simulador que tem a capacidade de simular sistema de produção, transporte, distribuição e de consumo de energia elétrica. A escolha recaiu na marca TERCO, modelo PST2200, equipado com 10 módulos, que vai ser o tema central do trabalho aqui descrito.

## 1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

Inicialmente, e ainda antes de qualquer intervenção, os responsáveis pelo simulador questionavam-se se valia a pena a reparação ou propor o equipamento para ser entregue a uma sucata. Este ato era justificado porque o simulador não funcionava desde maio de 2013 e já tinha sido tentada a sua reparação sem êxito.

No decorrer do ano letivo de 2014/2015, e após o final de uma aula ministrada pelo orientador deste projeto, este, durante uma conversa informal com o aluno que escreveu esta dissertação, fez o convite para a reparação, incluída numa dissertação de mestrado. Para atingir este objetivo, era necessário incluir mais um aluno, o que veio a acontecer com o convite a ser feito e aceite pelo Sr. Carlos Ferreira.

Iniciados os trabalhos no início do ano letivo de 2015/16, o primeiro objetivo foi encontrar a avaria principal que não permitia ter qualquer controlo sobre o simulador. A partir de que esta deteção e a sua reparação foram concluídas com sucesso, todos os objetivos já poderiam ser traçados. Estes basearam-se na deteção e correção de todas as



outras falhas, com o objetivo de otimizar ao máximo as funções de simulação e tornar o simulador o mais robusto e fiável possível.

Após o fim da reparação do simulador, o objetivo passou por descrever quais as manobras possíveis de serem realizadas com o estado atual do simulador. Como este equipamento é excessivamente básico, sugeriu-se algumas alterações a serem implementadas no futuro, para que as simulações passem por se aproximar da realidade que é encontrada na indústria de produção, transporte e distribuição de energia.

Por último, realizaram-se guiões adaptados às unidades curriculares ministradas no Laboratório de Sistemas de Energia, nomeadamente Sistemas de Energia 1 (SELE 1) e Sistemas de Energia 2 (SELE 2), orientados aos docentes, para ajudar e motivar a utilização do simulador.

## **1.2 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO**

Esta dissertação apresenta 6 capítulos, sendo o presente capítulo o introdutório. Neste capítulo encontra-se ainda a contextualização e os objetivos desta dissertação.

No capítulo 2 é apresentado o estado da arte, apresentando as soluções que o mercado oferece em termos de simuladores, diferenciando os simuladores em duas categorias: os de *hardware* ou os de *software* e são descritas as vantagens e desvantagens de cada opção. São apresentadas marcas e modelos comercializados e descritas as suas principais características técnicas. Ainda neste capítulo, é feita a apresentação do simulador TERCO PST 2200, apresenta-se a documentação existente e a que está em falta. No seguimento, descreve-se as funções dos 4 módulos e a descrição de cada um dos 10 painéis.

No capítulo 3 é feita a avaliação do estado de funcionamento do simulador. São descritas com detalhe as avarias detetadas e analisa-se as suas causas. São também descritas as correções e ações corretivas implementadas.

No capítulo 4, foram apresentadas as descrições das manobras que são possíveis atualmente de serem executadas, tal como propostas para possíveis manobras a executar alterando o simulador, nomeadamente a inclusão de disjuntores de *by-pass*, para simular a eventualidade da existência da necessidade de serem efetuadas ações de manutenção ou de substituição de disjuntores, sem ser necessário o corte do abastecimento de energia elétrica aos consumidores.

O capítulo 5 apresenta quatro propostas de guiões, direccionados aos docentes, a serem implementados no Laboratório de Sistemas de Energia, no âmbito das unidades curriculares de Sistemas Eléctricos de Energia 1 e Sistemas Eléctricos de Energia 2.

O capítulo 6 é dedicado às conclusões que foram possíveis de serem retiradas durante a realização deste trabalho e são propostos novos desafios para serem realizados pelos futuros alunos que optarem por dar continuidade a este projeto.



## 2. Estado da Arte

Os simuladores dividem-se em duas categorias: *hardware* e *software*. Os que são baseados em *hardware*, tal como o do ISEP, são constituídos por módulos físicos colocados numa instalação adequada ao seu tamanho e utilização. Os simuladores baseados em *software*, mais não são do que programas computacionais desenvolvidos para a utilização desejada. São instalados num ou mais computadores e a partir daí são usados com toda a comodidade.

### 2.1 SIMULADORES POR *HARDWARE*

Os simuladores baseados em *hardware* na atualidade, no que à simulação de sistemas elétricos de energia diz respeito, já não são fáceis de serem encontrados à venda. As únicas marcas que ainda se encontram no mercado são a TERCO e a LH, sendo a primeira a fabricante do equipamento que é propriedade do ISEP. Estes simuladores têm várias desvantagens face aos que trabalham baseados em *software*. São equipamentos que necessitam de um espaço considerável para os instalar, não são fáceis de transportar, necessitam de manutenção, estão sujeitos a avarias, são muito mais caros e não permitem atualizações com a facilidade de um equipamento baseado em *software*. A vantagem reside na possibilidade de interagir com um objeto físico.

Atualmente, a marca TERCO comercializa um simulador idêntico, mas com algumas atualizações face ao equipamento propriedade do ISEP. Nas figuras 1 e 2 pode-se observar o aspeto dos modelos comercializados atualmente e o existente no ISEP.



**Figura 1** - Simulador TERCO PST 2200 adquirido pelo ISEP.



**Figura 2** - Simulador PST 2200 atualmente em comercialização pela TERCO. [11]

O atual modelo é composto por 4 módulos:

- PST 2210 - Módulo da produção;

O módulo é constituído por três painéis de comando para simular uma central de produção de energia elétrica. É formado pelos painéis de produção, de sincronismo e pela subestação. Inclui relés de proteção, transformador elevador, transformadores de corrente, transformadores de tensão, barramentos, duas linhas de saída e instrumentos de medição das grandezas elétricas.

- PST 2220 - Módulo das linhas de transmissão e distribuição;

Constituído por dois painéis, neste módulo são simulados até sete modelos reais de linhas de transporte e distribuição de energia elétrica distribuídos por duas linhas de 100 km, uma linha de 50 km, duas linhas de 20 km e duas linhas de 5 km.

- PST 2230 - Módulo da subestação;

Este módulo, constituído por dois painéis, simula uma subestação abaixadora, que, pela alimentação elétrica das linhas de AT ao transformador abaixador, reduz o nível da tensão de AT para MT. Pelos dois barramentos existentes no lado da MT, distribui-se a energia elétrica pelas duas saídas existentes.

- PST 2240 - Módulo das cargas;

Neste módulo, dividido em dois painéis, tem-se cargas monofásicas num painel e no outro painel estão disponíveis as cargas trifásicas. Encontram-se disponíveis três tipos de cargas: indutivas, capacitivas e indutivas.

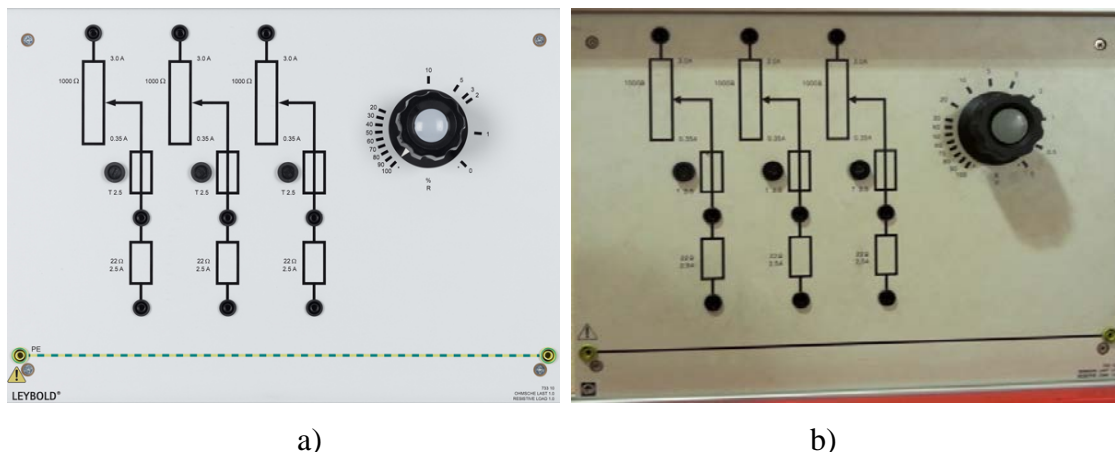
Adicionalmente, existem os módulos PST 2250 composto pelo sistema de supervisão e controlo e de aquisição de dados SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*), pelo PST 2270 composto pela turbina/gerador portáteis e o PST 2280 que simula o controlo do fator de potência.

Outro simulador por módulos que está representado no mercado, é o da marca LEYBOLD, anteriormente conhecido por LH, é composto por vários blocos, e atualmente substitui o simulador TERCO no Laboratório de Sistemas de Energia no ISEP, conforme está documentado na figura 3.



**Figura 3** - Simulador da marca LEYBOLD, existente no Laboratório de Sistemas de Energia, ISEP.

É constituído pelos módulos necessários para se proceder à simulação do sistema elétrico de energia, nomeadamente modelos de linhas, barramentos, cargas resistivas, capacitivas e indutivas, relé de máxima intensidade, amperímetros, voltímetros, frequencímetros, painel de sincronismo e ainda mais outros módulos também eles necessários para o trabalho de simulação. A apresentação gráfica dos vários blocos pouco ou nada alterou, conforme se pode verificar pela figura 4, que retrata, na figura 4a o atualmente comercializado e, na figura 4b, o que está no ISEP.



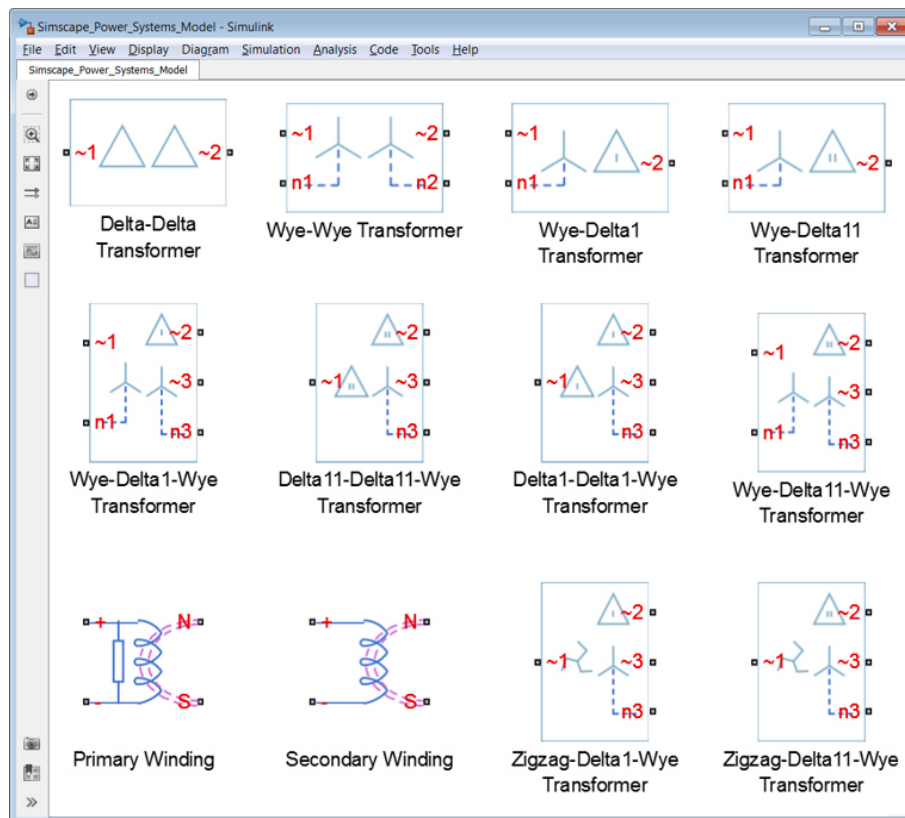
**Figura 4** - Modelo de Carga Resistiva: a) atualmente à venda [12], b) existente no Laboratório de Sistemas Elétricos, no ISEP.

## 2.2 SIMULADORES POR *SOFTWARE*

- *MATLAB / SIMULINK*

É o mais usado no ISEP e é fornecido pela produtora de *software* MathWorks. O MatLab integra o *Simulink* que suporta simulação, geração automática de código e teste contínuo e verificação de sistemas embebidos.

Dentro do *Simulink*, tem-se à disposição o *Simscape Power Systems* que fornece bibliotecas de componentes e ferramentas de análise para a modelação e simulação de sistemas elétricos de energia. Estão incluídos modelos de componentes tais como máquinas trifásicas, linhas de transmissão, transformadores, conforme o exemplificado na figura 5, barramentos, sistemas de energias renováveis, análise de harmónicos, cálculo da distorção harmónica total (THD), fluxo de carga, e outros componentes chave do sistema elétrico de energia. É possível integrar na simulação outros componentes, tais como os modelos mecânicos, hidráulicos, térmicos e outros existentes na família de componentes *Simscape*. [13]



**Figura 5** - Exemplo de componentes integrantes do *Simscape Power Systems - Simulink*. [14]

- *POWERWOLD SIMULATOR - MIT*

Mais um programa usado pelos alunos e docentes do ISEP, neste caso com uma utilização orientada para a eletrotecnia.

O *PowerWold Simulator* possibilita o estudo do trânsito de potências num ambiente gráfico bastante acessível como a figura 6 pode testemunhar. Incorpora uma gama alargada de produtos que providenciam as ferramentas necessárias aos comercializadores de energia elétrica, aos operadores das redes, formadores, docentes, alunos e a quaisquer outras pessoas interessadas na análise do sistema elétrico de energia.



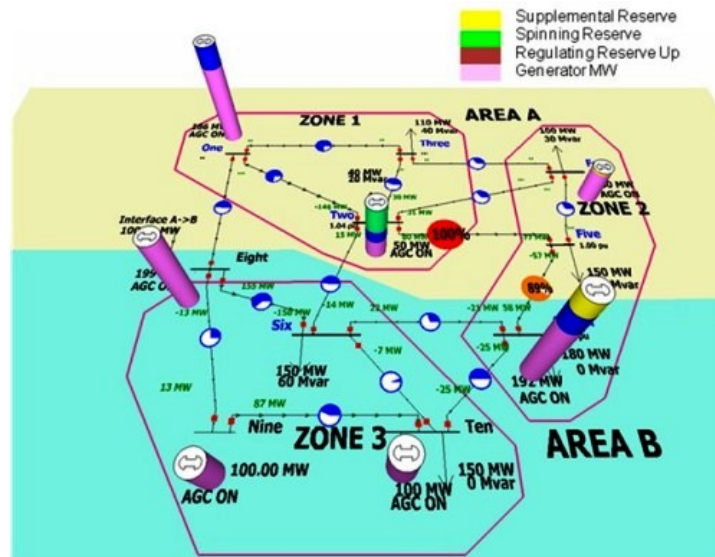


Figura 6 - Exemplo do ambiente gráfico do PowerWold. [15]

- *Power System Simulator Software - PSMS*

Este simulador, que pertence à marca Etap, faz uma previsão *on-line* capaz de prever o comportamento do sistema, de acordo com as ações implementadas pelo operador de rede utilizando dados de arquivo carregados em tempo real. Comparado com os métodos de treino tradicionais, a formação dos operadores é acelerada devido à utilização de simulação gráfica dinâmica do sistema de energia, visualizados na figura 7.

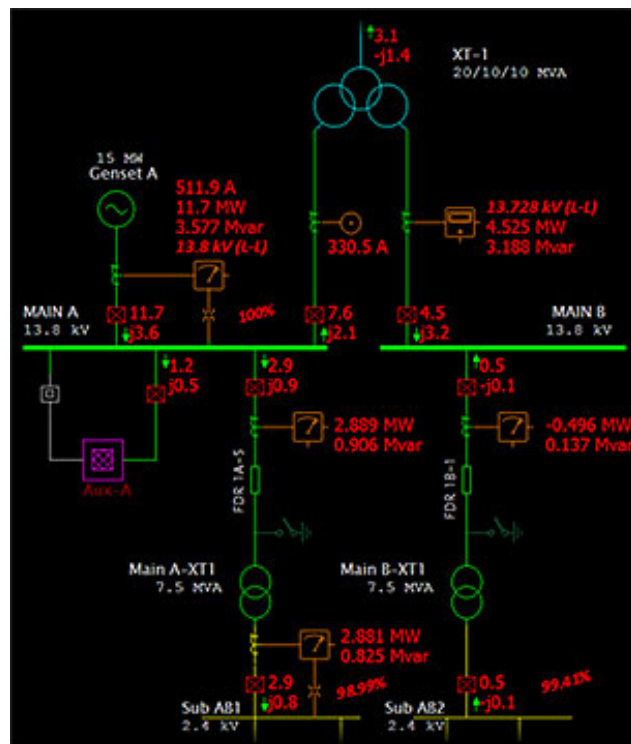


Figura 7 - Exemplo gráfico do simulador PSMS. [16]

Entre outras operações de simulação, as que são mais destacadas pela empresa que disponibiliza este *software* são:

- Simulação de manobras com disjuntores;
- Simulação de arranque de motores e variação de cargas;
- Previsão da resposta do sistema baseada nas ações do operador;
- Simulação em tempo real;
- Identifica problemas de funcionamento;
- Previsão do tempo de operação dos órgãos de proteção;
- Efetua "E, SE" nos cenários de funcionamento;
- Assistência e formação ao operador. [16]

- *CYME - Power System Simulation*

A empresa *EATON - Power Business Worldwide* comercializa um simulador, que se pode observar na figura 8, que, de acordo com esta empresa, é um *software* robusto, simples, mas ao mesmo tempo poderoso. Tem um conjunto abrangente de ferramentas de simulação avançadas de auxílio ao operador, no transporte e distribuição da energia elétrica.



**Figura 8** - Programa de redes elétricas CYME. [17]

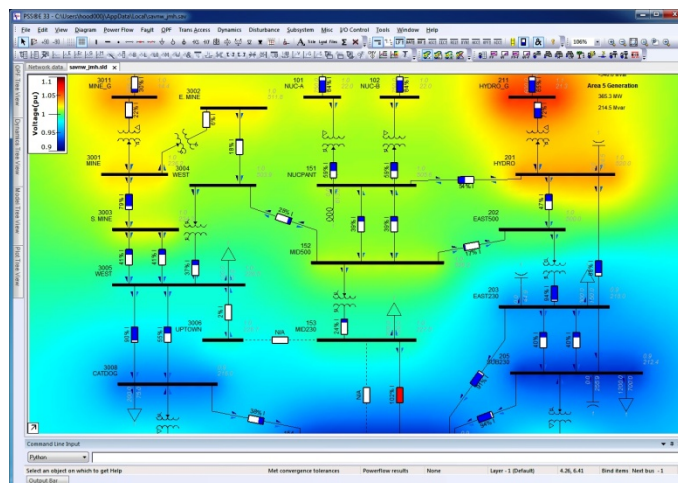
As capacidades analíticas deste programa suportam qualquer tipo de simulação do sistema elétrico de energia. Podem ser criados cenários e casos de estudo para, de modo eficiente e fiável, permitir avaliar e fundamentar o impacto das alterações e reconfigurações de qualquer rede de energia elétrica.

Adicionalmente, ainda existem módulos que podem ser adquiridos com a finalidade de aumentar as capacidades deste programa, tais como: "qualidade da energia", "análise em tempo real", "arco elétrico" e ainda outras soluções à medida das necessidades dos clientes.

- *Power Transmission System Planning Software - Siemens*

É um programa de análise e de planeamento utilizado pela indústria ligada à energia elétrica, que permite a simulação e modelização da rede de energia elétrica. Na figura 9 pode-se observar um exemplo da interface gráfica do *software* com o utilizador. Realça-se os seguintes recursos:

- Rápidas e robustas soluções para o trânsito de potências para a rede de energia. Aceita no máximo 200.000 barramentos;
- Análise automatizada dos barramentos PV/PQ;
- Rapidez de análise de contingências e tomada de medidas corretivas;
- Interface gráfica moderna;
- Trânsito de potências intuitivo e livreria atualizada com as novas tecnologias, tal como aerogeradores;
- Etc. [18]



**Figura 9** - Exemplo gráfico do modelo unifilar do *software* da Siemens. [18]

## 2.3 APRESENTAÇÃO DO SIMULADOR TERCO DO LABORATÓRIO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DO ISEP

O simulador foi construído pela marca Sueca TERCO I&S AB, fundada em 1963 e está representada em mais de 60 países. Esta marca fornece equipamentos educativos para vários níveis de ensino, desde escolas técnicas, universidades e centros de formação.

Apesar da falta da chapa de características para facilmente identificar o equipamento, no caso específico o ano de fabrico, sabe-se que este pertencente ao ISEP desde 1993, contando atualmente 23 anos.

### 2.3.1 DOCUMENTAÇÃO EXISTENTE

A localização dos manuais encontra-se no armário B na sala I107, designada de Laboratório de Sistemas de Energia, e encontram-se de uma forma geral, num bom estado de conservação, testemunhado pela figura 10.

Os manuais atualmente disponíveis são:

- Manual/ User Guide: Section 3 - Experiment Sugg. and Common Theory (2 exemplares);
- Manual/ User Guide: Section 4 - Protection Specs. (2 exemplares);
- PST2200 Power System Simulator - Section 1;
- PST2200 Power System Simulator - Section 2;
- PST2200 Power System Simulator - Section 3;
- PST2200 Power System Simulator - Section 5;

As secções 1 e 2 do *Manual/ User Guide* e o *PST2200 Power System Simulator - Section 4*, estão em parte incerta.



**Figura 10** - Manuais existentes no laboratório.

De referir também a ausência dos esquemas elétricos originais e, para colmatar a sua falta, estão disponíveis os que foram feitos aquando da dissertação de mestrado, do então aluno, o Sr. Eng.º Joaquim Perfeito (ver figura 11 que ilustra a página inicial). Na altura, o aluno fez um levantamento do circuito elétrico do simulador de um modo exaustivo que, para o atual trabalho, teve uma importância significativa, principalmente para identificar o ponto de ligação correto dos condutores que foram encontrados desligados.

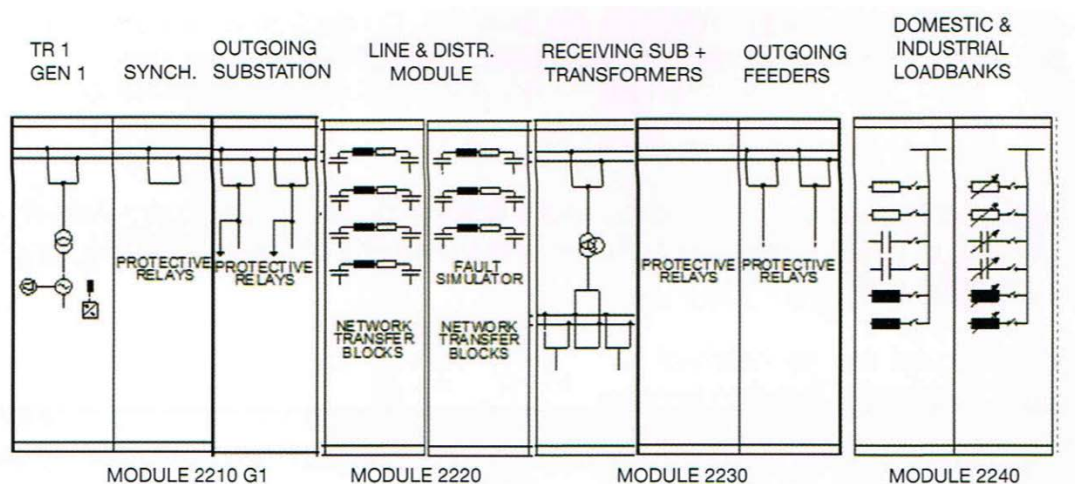


**Figura 11** - Capa do caderno que contém os esquemas elétricos existentes no laboratório. [19]

### 2.3.2 DESCRIÇÃO DOS MÓDULOS

O simulador está distribuído por 4 módulos. Cada módulo segue o esquema apresentado na figura 12, e é constituído por 10 painéis do C1 ao C10:





**Figura 12** - Distribuição dos módulos do simulador TERCO PST2200.

Assim sendo, vão ser descritos as funções de cada módulo e destes, quais os painéis de que fazem parte, referindo qual a sua utilidade, componentes usados e a sua função.

### Módulo nº 1 PST2210 - Central de produção de energia elétrica e subestação incluindo as proteções e controlo.

A produção está a cargo de uma máquina síncrona reversível, trifásica, que atua, neste caso, como gerador, com as características apresentadas na figura 13 a), e a energia mecânica fornecida provém de um motor CA assíncrono trifásico e as suas características apresentadas na figura 13 b).



a)

b)

**Figura 13** - Chapa de características a) do gerador b) do motor.

Este módulo inclui um transformador elevador de 1,2 kVA. As restantes características podem ser visualizadas na figura 14.



**Figura 14** - Chapa de características do transformador elevador.

No caso de se optar somente por efetuar experiências laboratoriais com o transformador, por exemplo, os testes em vazio ou em curto-circuito, os enrolamentos estão acessíveis externamente. A alimentação das linhas de transmissão A e B são alimentadas pelo lado de alta tensão deste transformador.

Estão também as diversas proteções, barramentos de AT (designados por A230 e B230) que, por ação do paralelo de barras, permite colocar em serviço o barramento que não está a ser alimentado pelo transformador e assegura a proteção dos disjuntores dos painéis C1, C3 e C6 no caso de avaria ou manutenção destes, se existirem seccionadores de *by-pass* entre uma das linhas e a saída de alta do transformador do painel C1 (exemplo para o painel C1). Inclui ainda os instrumentos de sincronismo, 2 analisadores de energia, instalados posteriormente pelo ISEP, que garantem leituras mais precisas e mais completas do que os instrumentos de medição que estão instalados de origem. Inclui também todos os comandos para alterar a configuração da rede de AT. Resumindo, trata-se de uma simulação de uma central produtora de energia elétrica e a sua subestação elevadora que envia a energia elétrica produzida para a rede de transporte.

Este módulo contém os painéis:

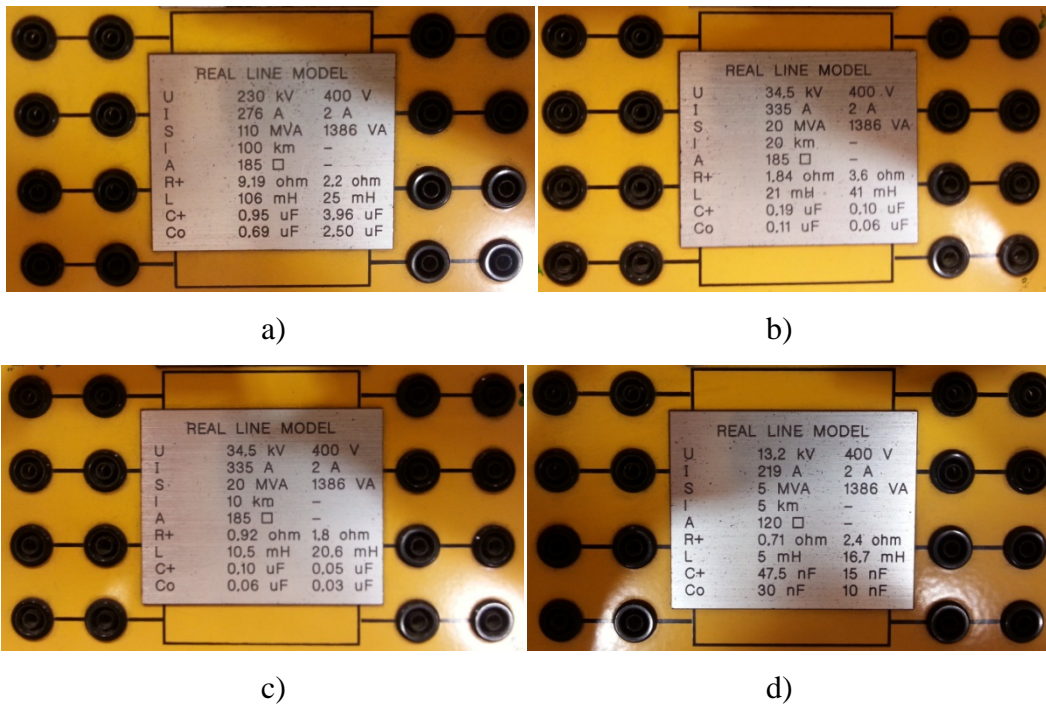
- C1 designado por painel de produção (*GEN. 1*) onde é possível controlar a produção e a entrada da energia elétrica na rede de transporte por injeção nas linhas A e B. É constituído por:
  - Alimentação principal;
  - Cabos do motor/ gerador;
  - Fontes de alimentação com diversos níveis de tensão;
  - Inversor de frequência CFW 700;
  - Fonte de tensão CC controlada;

- Circuitos de arranque;
  - Transformador principal;
  - Módulos de contactores;
  - Transformadores de corrente;
  - Transformadores de tensão;
  - Circuitos de medidas CA;
  - Circuitos de medidas CC;
  - Instrumentos de medição;
  - Interruptores frontais de operação.
- C2 está referenciado como painel de sincronismo (*SYNCHR.*). Faz parte deste painel dois barramentos e os instrumentos necessários ao sincronismo. Este é constituído por:
    - Contactores do módulo de sincronismo;
    - Instrumentos de sincronização;
    - Módulos de contactores;
    - Interruptores frontais de operação;
    - Instrumentos de medição;
    - Relés de proteção;
    - Placa de controlo lógico "VAKA";
    - Circuitos de medição CA.
- C3 é o painel com duas saídas da subestação para o envio da produção para a rede de transporte (L1HT e L2HT). Está colocado o seguinte equipamento:
    - Interruptores frontais de operação;
    - Instrumentos de medição;
    - Módulos de contactores;
    - Relés de proteção;
    - Circuitos de medição CA.

### **Módulo nº 2 PST2220 - Linhas de transmissão e módulo de distribuição**

Cada modelo de linha consiste num sistema trifásico em pi. Os modelos estão identificados numa placa colocada nos painéis C4 e C5 conforme a figura 15 abaixo o demonstra.





**Figura 15** - Grandezas das linhas dos painéis C4 e C5 a) 100 km, b) 20 km, c) 10 km e d) 5 km.

Quanto à sua classificação, estas podem ser linhas curtas, médias ou longas. Para ser considerada linha curta, esta está limitada até aos 80 km. As linhas médias vão desde os 80 km até aos 240 km e as linhas longas têm mais de 240 km.

Neste simulador, existem 7 linhas, distribuídas por 2 linhas com 100 km, 2 linhas com 20 km, 1 linha com 10 km e 2 linhas com 5 km. Considerando o comprimento máximo existente, só é possível efetuar simulações de linhas curtas e linhas médias, embora tenha a opção de se ligar em série todos os modelos de linhas, totalizando 260 km.

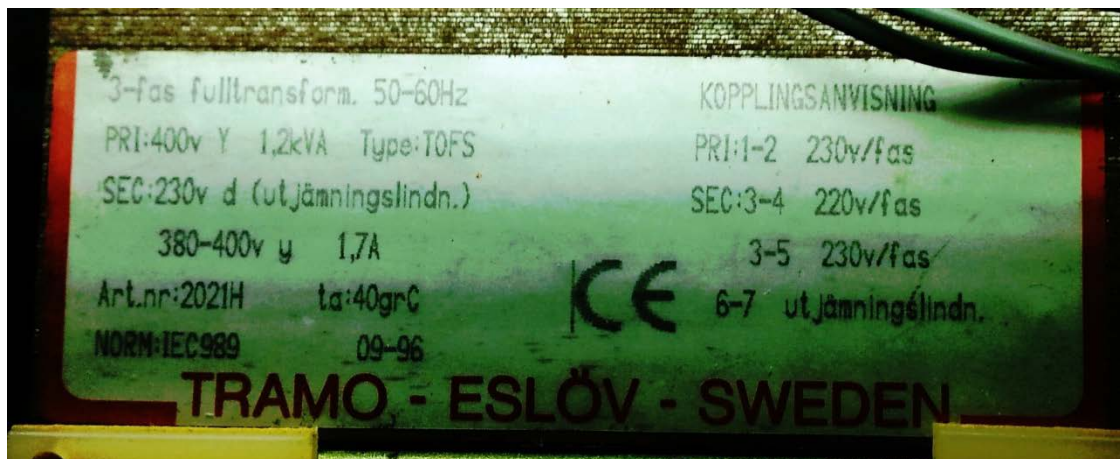
Este módulo contém os painéis:

- C4 é o painel dedicado à simulação de linhas de transporte reais (designado por *LINE MODELS*). No seu interior estão colocados componentes passivos: resistências, bobinas e condensadores, para que, do exterior, se possam interligar em série e possibilitar a simulação e o cálculo dessas mesmas linhas. Tem-se à disposição no painel:
  - Modelos de linhas (4 unidades) com os seguintes comprimentos;
    - 2 linhas de 100 km;
    - 1 linhas de 20 km;
    - 1 linha de 10 km;
  - Módulos de ligação dos modelos de linhas (4 unidades).

- C5 é um painel similar ao C4, com valores diferentes dos parâmetros das linhas e a mesma designação. Tem-se à disposição no painel:
  - Modelos de linhas (3 unidades);
    - 1 linhas de 20 km;
    - 2 linhas de 5 km.
  - Módulos de ligação dos modelos de linhas (3 unidades);
  - Blocos de transferência primários (3 unidades).

### Módulo nº 3 PST2230 - Módulo da subestação e proteções

Para serem abastecidas as cargas, é necessário adaptar o perfil de tensão. Sendo necessário efetuar a diferenciação entre a rede de transporte e a rede de distribuição, neste simulador é neste módulo que se pode definir esta fronteira, com a colocação da subestação abaixadora. Passa-se de uma rede de AT para uma rede de MT. As características do transformador abaixador estão apresentadas na figura 16.



**Figura 16** - Chapa de características do transformador abaixador.

- C6 (*SUB. STAT. HV/MV*), é o painel de simulação de uma subestação abaixadora. Efetua a transição da tensão de AT (tensões superiores a 45 kV até os 110 kV) para MT (tensões superiores a 1 kV até os 45 kV). A energia elétrica chega à subestação pelas linhas A e B, passa pelo transformador abaixador e vai alimentar dois barramentos de MT que permitem alimentar as cargas. Para chegar a energia elétrica aos barramentos, tem-se a oportunidade de efetuar manobras de abertura e fecho dos seccionadores e

ligar e desligar os disjuntores colocados neste painel. Descreve-se assim os componentes que fazem parte deste painel:

- Interruptores frontais de operação;
  - Instrumentos de medição frontais;
  - Módulo de contactores;
  - Circuito de medição CA;
  - Transformadores de corrente (TI);
  - Placa de controlo lógico "VAKA".
  - Transformador principal da subestação.
- C7 (*AUX. PROT.*) painel que incorpora as proteções auxiliares, nomeadamente as proteções contra sobreintensidades dos barramentos, proteções diferenciais do transformador, proteções contra sobreintensidades AT / MT, entre outras.
  - C8 (*MV FEEDERS*), painel que permite simular a alimentação de cargas de MT através dos blocos de transferência 1 e 2. Incorpora mais um grupo de proteções. Este módulo tem incluído os componentes abaixo descritos:
    - Interruptores frontais de operação;
    - Instrumentos de medição frontais;
    - Módulo de contactores;
    - Relés de proteção;
    - Circuito de medição CA;
    - Transformadores de corrente (TI);
    - Blocos de transferência (2 unidades).

#### **Módulo nº 4 PST2240 - Módulo de cargas**

Faz parte deste módulo grupos de cargas monofásicas e trifásicas. Estão disponíveis cargas resistivas, capacitivas e indutivas, com os valores destas cargas descritas aquando da apresentação do painel, para simular o que se passa na distribuição da energia elétrica em baixa tensão (BT). É possível cobrir uma grande variedade de possibilidades, escolhendo a associação de grupos de resistências, bobinas e condensadores, existindo a possibilidade de criar cargas desequilibradas.

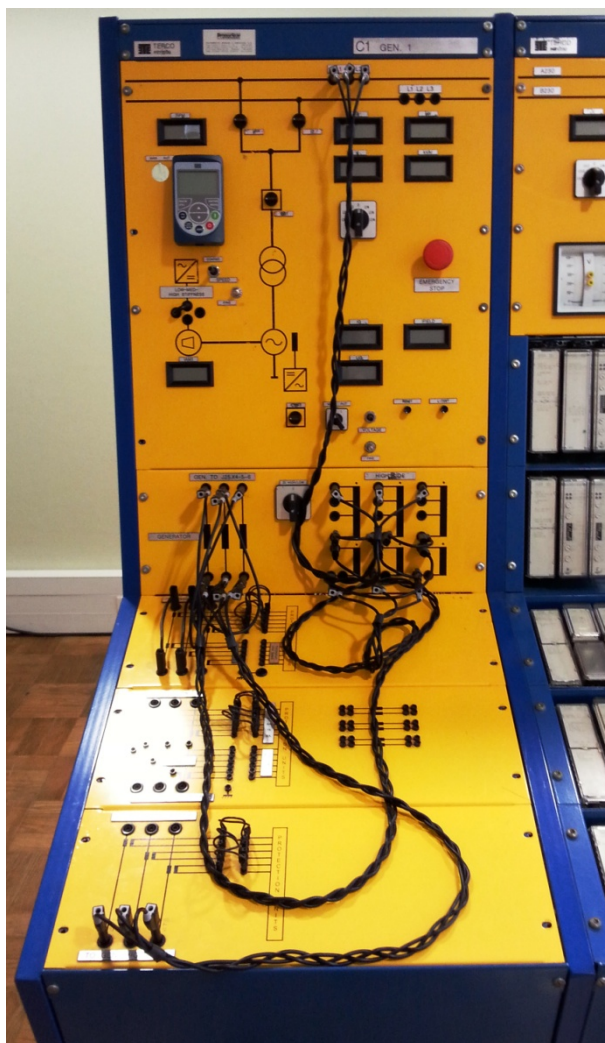
- C9 (*1-PH. LOADS*) é um painel que contém cargas monofásicas, resistivas, capacitivas e indutivas, para serem interligadas de acordo com as necessidades da simulação pretendida. Este painel é composto por:
  - Interruptores frontais de operação monofásicos para ligar as cargas;
  - Bloco de transferência (1 unidade);
  - 6 cargas resistivas monofásicas com o valor individual por carga de 470  $\Omega$  (valor da impedância);
  - 6 cargas capacitivas monofásicas com o valor individual por carga de 390  $\Omega$  (valor da impedância);
  - 6 cargas indutivas monofásicas com o valor individual por carga de 390  $\Omega$  (valor da impedância);
  - Barramento de ligação.
  
- C10 (*3-PH. LOADS*) é um painel que contém cargas trifásicas, resistivas, capacitivas e indutivas, para serem interligadas de acordo com as necessidades da simulação pretendida. Este painel é composto por:
  - Interruptores frontais de operação trifásicos para a variação da carga desde 0 a 100% do seu valor;
  - Bloco de transferência (1 unidade);
  - 2 grupos, com cada grupo a possuir, por fase, 3 cargas resistivas com o valor de 690  $\Omega$  (valor da impedância);
  - 2 grupos, com cada grupo a possuir, por fase, 3 cargas capacitivas com o valor de 690  $\Omega$  (valor da impedância);
  - 2 grupos, com cada grupo a possuir, por fase, 3 cargas indutivas com o valor de 690  $\Omega$  (valor da impedância);
  - Barramento de ligação.

### 2.3.3 DESCRIÇÃO DOS PAINÉIS FRONTAIS

Os instrumentos colocados na parte frontal do equipamento têm as suas funções, tal como controlar, manobrar e obter medidas. As designações dos diversos componentes frontais têm uma designação diferente da que é apresentada na identificação traseira, por isso, vai ser apresentada a designação frontal entre parênteses.

**Painel C1 (figura 17):**

- I1 (RPM): Mostrador digital da velocidade do veio de acoplamento entre o motor e o gerador.
- I2 (IAM1): Mostrador digital da corrente de armadura do motor CC (não utilizado devido à atualização do motor CC para um motor CA).
- I3 (A): Mostrador digital de corrente CA do transformador do lado *High Side*.
- I4 (V): Mostrador digital de tensão CA do transformador do lado *High Side*.
- I5 (kW): Mostrador digital de potência ativa CA do transformador do lado *High Side*.
- I6 (kVAr): Mostrador digital de potência reativa CA do transformador do lado *High Side*.
- I7 (IG): Mostrador digital de corrente do estator do gerador.
- I8 (UG): Mostrador digital de tensão no gerador.
- I9 (IFIELD): Instrumento indicador da corrente de excitação.
- P1 (SPEED/COARSE): Regulação de velocidade.
- P2 (VOLTAGE): Regulação de tensão (corrente de excitação).
- S1 (I1): Seccionador.
- S2 (I2): Seccionador.
- S3 (CB1): Disjuntor.
- S4 (CBM1): Disjuntor (liga o variador de velocidade).
- S5 (CBF1): Disjuntor (liga a fonte de tensão CC controlada que controla o valor da excitação do gerador).
- S8: Comutador de seleção de tensão (L3L1 L2L3 L1L2 0 L1N L2N L3N).
- S10 (EMERGENCY STOP): Botão de paragem de emergência.
- S11 (L-TEST): Botão de pressão para efetuar o teste das lâmpadas dos seccionadores e disjuntores.
- S12 (RESET): Botão de pressão que elimina a(s) situação(ões) de avaria(s) das proteções.
- C1-K17: Regula as saídas e entradas do transformador (Não utilizado).



**Figura 17 - Painel C1.**

**Painel C2 (figura 18):**

I1 (V): Mostrador digital de tensão no barramento A.

I2 (V): Mostrador digital de tensão no barramento B.

I3: Voltímetro de sincronismo.

I4 (SYNCHRONIZING): Sincronoscópio analógico.

I5: Frequencímetro analógico.

L1-L3 (PHASING LAMPS): Lâmpadas de sincronismo.

S1 (I3): Seccionador do paralelo de barras.

S2 (I4): Seccionador do paralelo de barras.

S3 (CB2): Disjuntor do paralelo de barras.

S4: Comutador de seleção de tensão (L3L1 L2L3 L1L2 0 L1N L2N L3N).

S5: Comutador de seleção de tensão (L3L1 L2L3 L1L2 0 L1N L2N L3N).

S6: Comutador de seleção de sincronismo (CB1 CB2 CB3 CB4 0).



Relés de proteção.



**Figura 18** - Painei C2.

**Painei C3 (figura 19):**

- I1 (kW): Mostrador digital de potência ativa à saída da linha A (CA).
- I2 (kVAr): Mostrador digital de potência reativa à saída da linha A (CA).
- I3 (A): Mostrador digital de intensidade de corrente à saída da linha A (CA).
- I4 (V): Mostrador digital de tensão à saída da linha A (CA).
- I5 (kW): Mostrador digital de potência ativa à saída da linha B (CA).
- I6 (kVAr): Mostrador digital de potência reativa à saída da linha B (CA).
- I7 (A): Mostrador digital de intensidade de corrente à saída da linha B (CA).
- I8 (V): Mostrador digital de tensão à saída da linha B (CA).
- S1 (I5): Seccionador.

S2 (I6): Seccionador.

S3 (CB3): Disjuntor.

S4 (I9): Seccionador.

S5 (I1E): Seccionador de terras.

S6 (I7): Seccionador.

S7 (I8): Seccionador.

S8 (CB4): Disjuntor.

S9 (I10): Seccionador.

S10 (I2E): Seccionador de terras.

Analísadores de energia JANITZA, modelo UMG96S

Relés de proteção.



**Figura 19** - Painei C3.



**Painel C4 (figura 20):**

OH LINE 1: Modelo de linha com 100 km.

OH LINE 2: Modelo de linha com 100 km.

OH LINE 3: Modelo de linha com 20 km.

OH LINE 4: Modelo de linha com 10 km.



**Figura 20** - Painel C4.

**Painel C5 (figura 21):**

OH LINE 5: Modelo de linha com 5 km.

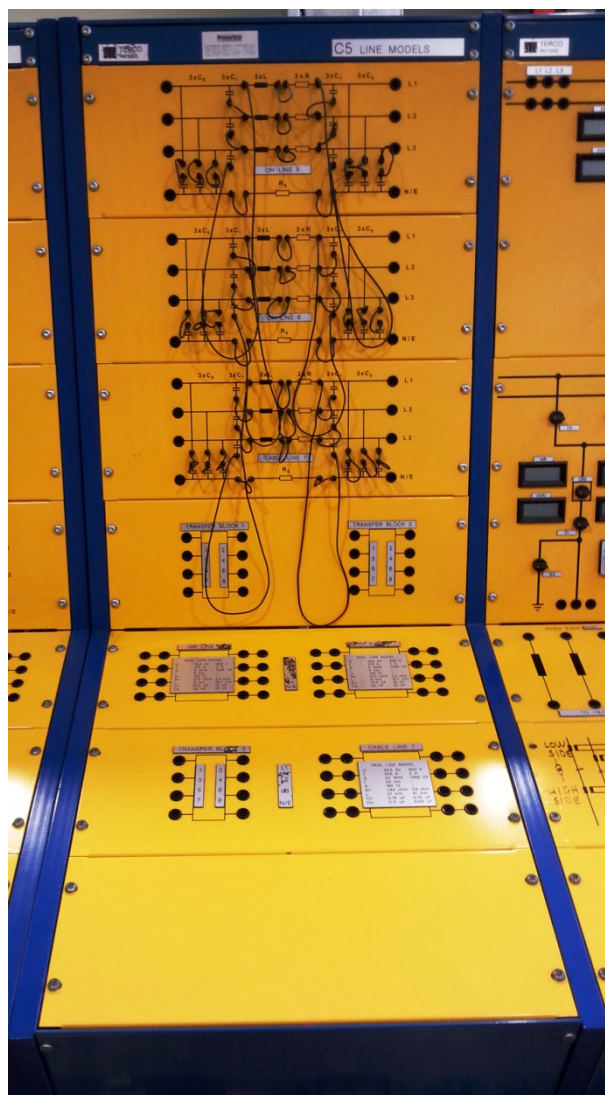
OH LINE 6: Modelo de linha com 5 km.

OH LINE 7: Modelo de linha com 20 km.

TRANSFER BLOCK 1: Bloco de transferência 1.

TRANSFER BLOCK 2: Bloco de transferência 2.

TRANSFER BLOCK 3: Bloco de transferência 3.



**Figura 21** - Painel C5.

**Painel C6 (figura 22):**

I1 (kW): Mostrador digital de potência ativa à saída do transformador.

I2 (kVAr): Mostrador digital de potência reativa à saída do transformador.

I3 (A): Mostrador digital de intensidade de corrente à saída do transformador.

I4 (V): Mostrador digital de tensão à saída do transformador.

I5 (V BUS A-B HV): Mostrador digital da diferença de potencial entre os barramentos A e B.

S1 (CB8): Disjuntor.

S2 (CB9): Disjuntor.

S3 (I19): Seccionador.

S4 (IE5): Seccionador de terras.

S5 (CB7): Disjuntor.

S6 (V T3 LOW): Comutador de seleção de tensão (L3L1 L2L3 L1L2 0 L1N L2N L3N).

S7 (I17): Seccionador.

S8 (I18): Seccionador.

S9: Comutador de seleção de tensão (L1-L1 L2-L2 L3-L3).

I1 (kW): Mostrador digital de potência ativa à saída da linha A (CA).

I2 (kVAr): Mostrador digital de potência reativa à saída da linha A (CA).

I3 (A): Mostrador digital de intensidade de corrente à saída da linha A (CA).

I4 (V): Mostrador digital de tensão à saída da linha A (CA).

I5 (kW): Mostrador digital de potência ativa à saída da linha B (CA).

I6 (kVAr): Mostrador digital de potência reativa à saída da linha B (CA).

I7 (A): Mostrador digital de intensidade de corrente à saída da linha B (CA).

I8 (V): Mostrador digital de tensão à saída da linha B (CA).

S1 (I13): Seccionador.

S2 (I14): Seccionador.

S3 (CB5): Disjuntor.

S4 (I11): Seccionador.

S5 (IE5): Seccionador de terras.

S6 (I15): Seccionador.

S7 (I16): Seccionador.

S8 (CB6): Disjuntor.

S9 (I12): Seccionador.

S10 (IE4): Seccionador de terras.

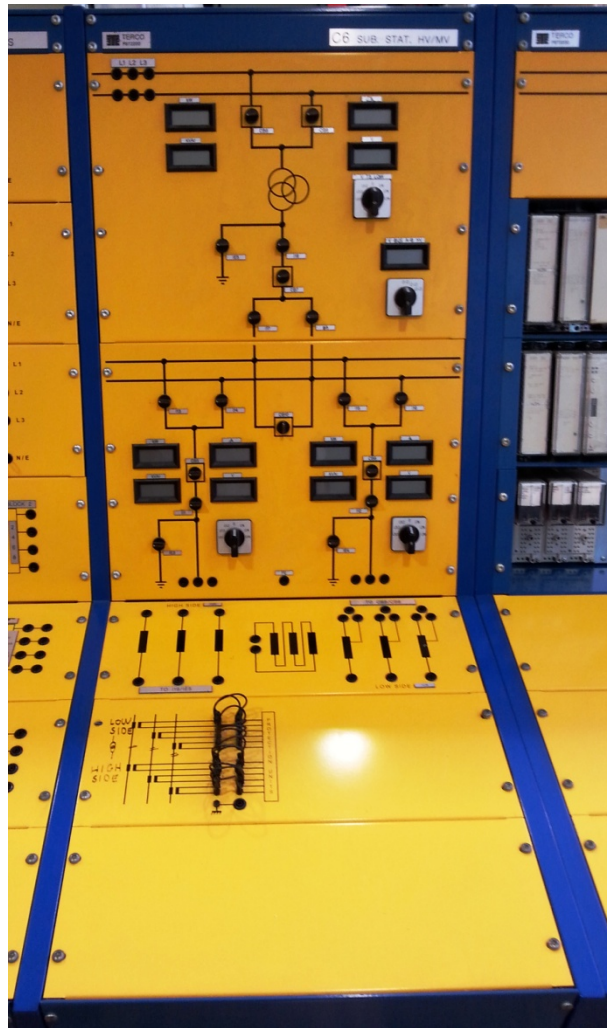
S11 (CB10): Disjuntor.

S12: Comutador de seleção de tensão (L1-L1 L2-L2 L3-L3).

S13: Comutador de seleção de tensão (L1-L1 L2-L2 L3-L3).

Entradas e saídas dos transformadores de corrente.

Entradas e saídas do transformador principal da subestação.



**Figura 22** - Painel C6.

**Painel C7 (figura 23):**

S1 (RESET): Botão de pressão que elimina as situações de avaria das proteções.

Relés de proteção da subestação.



**Figura 23** - Painel C7.

**Painel C8 (figura 24):**

I1 (A): Mostrador digital de intensidade de corrente à saída da linha 1 (CA).

I2 (V): Mostrador digital de tensão à saída da linha A (CA).

I3 (kW): Mostrador digital de potência ativa à saída da linha A (CA).

I4 (kVAr): Mostrador digital de potência reativa à saída da linha A (CA).

I5 (A): Mostrador digital de intensidade de corrente à saída da linha B (CA).

I6 (V): Mostrador digital de tensão à saída da linha B (CA).

I7 (kW): Mostrador digital de potência ativa à saída da linha B (CA).

I8 (kVAr): Mostrador digital de potência reativa à saída da linha B (CA).

S1 (CB11): Disjuntor.

S2 (CB12): Disjuntor.

S3 (CB13): Disjuntor.

S4 (CB14): Disjuntor.



S5 (V FEEDER 1): Comutador de seleção de tensão (L3L1 L2L3 L1L2 0 L1N L2N L3N).

S6 (V FEEDER 2): Comutador de seleção de tensão (L3L1 L2L3 L1L2 0 L1N L2N L3N).

TRANSFER BLOCK 1: Bloco de transferência 1.

TRANSFER BLOCK 2: Bloco de transferência 2.

Relés de proteção.



**Figura 24** - Painel C8.

**Painel C9 (figura 25):**

TRANSFER BLOCK 3: Bloco de transferência 3.

Cargas Resistivas (2 grupos com Impedância =  $3 \times 470 \, \Omega$ ):

S1: Interruptor monofásico da carga (0 - 1).

S2: Interruptor monofásico da carga (0 - 1).

S3: Interruptor monofásico da carga (0 - 1).

S4: Interruptor monofásico da carga (0 - 1).

S5: Interruptor monofásico da carga (0 - 1).

S6: Interruptor monofásico da carga (0 - 1).

Cargas Capacitivas (Impedância =  $6 \cdot 390 \, \Omega$ ):

S1: Interruptor monofásico da carga (0 - 1).

S2: Interruptor monofásico da carga (0 - 1).

S3: Interruptor monofásico da carga (0 - 1).

S4: Interruptor monofásico da carga (0 - 1).

S5: Interruptor monofásico da carga (0 - 1).

S6: Interruptor monofásico da carga (0 - 1).

Cargas Indutivas (Impedância =  $6 \cdot 390 \, \Omega$ ):

S1: Interruptor monofásico da carga (0 - 1).

S2: Interruptor monofásico da carga (0 - 1).

S3: Interruptor monofásico da carga (0 - 1).

S4: Interruptor monofásico da carga (0 - 1).

S5: Interruptor monofásico da carga (0 - 1).

S6: Interruptor monofásico da carga (0 - 1).

S1: Interruptor para a fonte de alimentação do triac (esquerda).

S1: Interruptor para a fonte de alimentação do triac (direita).

L1: Lâmpada de sinalização para o triac esquerdo.

L1: Lâmpada de sinalização para o triac direito.

X1-X4: Borne de ligação da saída do triac.

X5-X6: Bornes de ligação para a resistência da carga ( $70 \, \Omega$ , 600 W).



**Figura 25** - Painel C9.

**Painel C10 (figura 26):**

TRANSFER BLOCK 3: Bloco de transferência 3.

Cargas Resistivas (Impedância =  $3 \times 6 \times 690 \, \Omega$ ):

S1: Comutador trifásico de seleção de carga com 6 posições.

S2: Comutador trifásico de seleção de carga com 6 posições.

Cada posição de S1 e de S2 corresponde a cerca de 25% da carga nominal.

Cargas Capacitivas (Impedância =  $3 \times 6 \times 690 \, \Omega$ ):

S3: Comutador trifásico de seleção de carga com 6 posições.

S4: Comutador trifásico de seleção de carga com 6 posições.

Cada posição de S3 e de S4 corresponde a cerca de 25% da carga nominal.

Cargas Indutivas (Impedância =  $3 \times 6 \times 690 \, \Omega$ ):

S5: Comutador trifásico de seleção de carga com 6 posições.

S6: Comutador trifásico de seleção de carga com 6 posições.

Cada posição de S5 e de S6 corresponde a cerca de 25% da carga nominal.



X1-X6: Bornes de ligação ao transformador Y/ $\Delta$  400/400 V.



**Figura 26** - Painel C10.

## 2.4 RESUMO

Neste capítulo é apresentado o equipamento TERCO PST2200 composto por 4 módulos e 10 painéis. Cada módulo tem uma função específica: o primeiro módulo é constituído por 3 painéis e simula a produção. A simulação do transporte faz parte do segundo módulo constituído por dois painéis com modelos de reais de linhas de transmissão. O módulo distribuição é constituído por mais três painéis e, por último, é feita a simulação do consumo no último módulo, constituído por dois painéis.

Nos painéis, localizam-se as ferramentas necessárias para alterar todos os parâmetros possíveis de serem modificados para efeitos de simulação. O modelo da subestação elevadora é simulado no primeiro painel. O painel de sincronismo mais as diversas

proteções pertencem ao segundo e no terceiro são simuladas as saídas e proteções do transformador, das linhas e do gerador. Os painéis quarto e cinco incorporam sete modelos de linhas AT. O sexto painel apresenta a subestação abaixadora. O painel 7 alberga as proteções das linhas e do transformador. No painel 8 tem-se as saídas de MT para alimentar as cargas monofásicas que se encontram no painel 9 e as cargas trifásicas no painel 10.

Aqui é permitido efetuar simulações da rede elétrica de energia, não sendo importante para o efeito qual a tecnologia que está por detrás da sua produção.



# 3. Avaliação do estado inicial de funcionamento do simulador

No início do trabalho, o simulador, no que à tentativa de executar as manobras diz respeito, não funcionava. E para se ter a noção exata do problema, resume-se a situação assim: não permite fazer manobras, logo o simulador não passava de um equipamento inútil atendendo à sua função inicial.

Ligando-o, este apresentava constantemente o *flash-lamp* atuado nos disjuntores. Esta sinalização de erro significa que existe uma falha na alimentação de energia elétrica. Com esta situação a ocorrer, era impossível realizar manobras com sucesso e mais uma vez chega-se à mesma conclusão: inviabiliza o uso do equipamento a 100%. O trabalho de pesquisa das avarias existentes no simulador, foram iniciadas a partir desta primeira informação, conduzindo posteriormente à deteção de muitas mais situações de defeito, conforme se vai expor no decorrer deste capítulo, que segue uma ordem cronológica dos acontecimentos.

Uma solução encontrada para simplificar o processo de diagnóstico das avarias foi separar os painéis C1, C2 e C3 dos restantes e trabalhar somente nestes três. Só a partir da alínea e) do ponto seguinte é que se ligaram novamente todos os painéis.

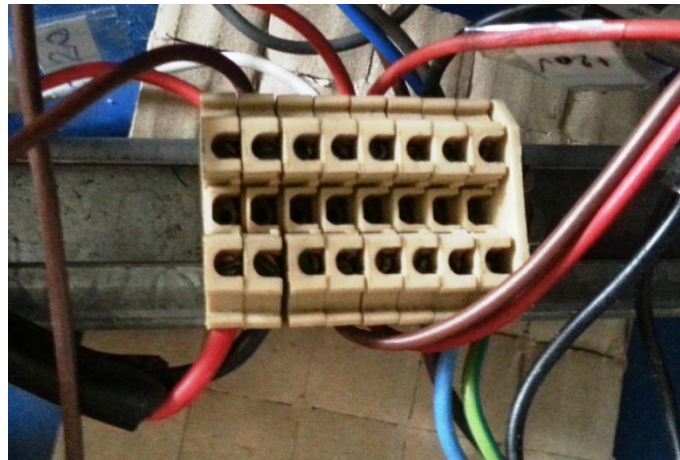
## 3.1 DESCRIÇÃO DETALHADA DAS AVARIAS DETETADAS E ANÁLISE DE CAUSAS

### a) Falta de alimentação de energia elétrica dos diversos componentes elétricos.

Era um dos principais problemas que o simulador apresentava. Quando se começou a analisar a raiz do problema, foi feita uma verificação ao estado do bloco de bornes, apresentado na figura 27, que fornece os diversos níveis de tensão. Estes alimentam os componentes necessários ao bom funcionamento do equipamento, servindo como exemplo: os relés de proteção, as placas de controlo lógico, que são responsáveis pelo aparecimento do erro que bloqueava o simulador, e as placas de medições.

Foi detetado que a maioria dos condutores que aí deveriam estar ligados, ou estavam soltos ou o aperto dos parafusos dos bornes que suportavam os fios estavam com pouco

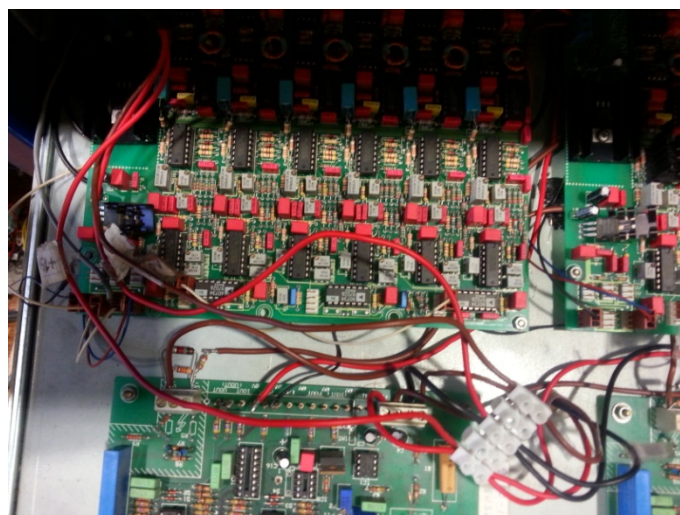
aperto. Esta situação não permitia que existisse uma boa continuidade entre os condutores ou mesmo a ausência de continuidade.



**Figura 27** - Bloco de bornes de distribuição dos diversos níveis de tensão, painel C1.

- b) Placa de medições MM1 e MM2 pertencentes ao painel C1 parcialmente desligadas.

Após a correção da alimentação de energia elétrica para estas placas, nos mostradores digitais existentes nos painéis C1, C2 e C3, não eram apresentadas todas as medidas. Foi feita uma análise às duas placas, as MM1 (na figura 28) e a MM2, que estão instaladas no painel C1 e foram detetados condutores desligados. Com o esquema elétrico como suporte, ainda se detetou que os poucos que estavam ligados, alguns destes não estavam ligados corretamente.



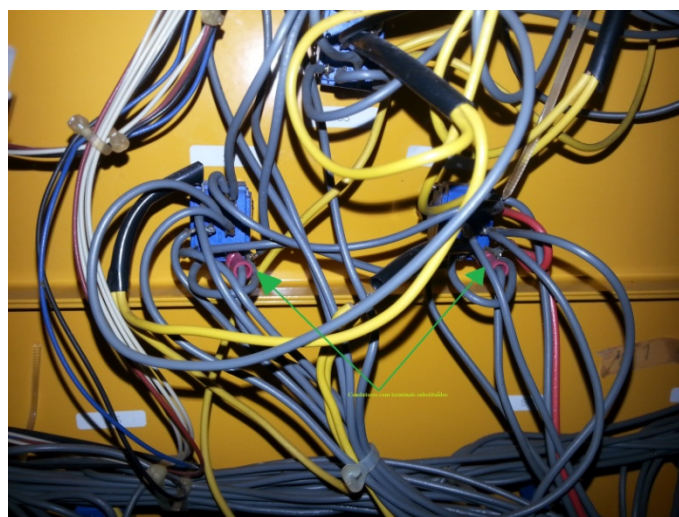
**Figura 28** - Placa de medidas MM1, painel C1.

- c) Diversos condutores elétricos desligados.

Além dos condutores desligados descritos na alínea a), o equipamento apresentava uma série de outros condutores elétricos desligados. São exemplos, um condutor do relé de proteção RK 646 009 - DA, instalado no painel C2. Alguns contactores tinham condutores desligados ou com um aperto deficiente, sendo o caso mais grave, os que estavam instalados no painel C8. O mesmo se passou com um terminal de cada um dos três aparelhos dedicados ao sincronismo, como se pode verificar pela figura 29. No painel C6 foi detetado os seccionadores S7 (I17) e S8 (I18) que possuíam, cada um, um condutor desligado conforme se verifica com a consulta da figura 30, o problema foi solucionado com o cravamento de novos terminais.



**Figura 29** - Ligadores que foram alvo de intervenção no equipamento de sincronismo, painel C2.

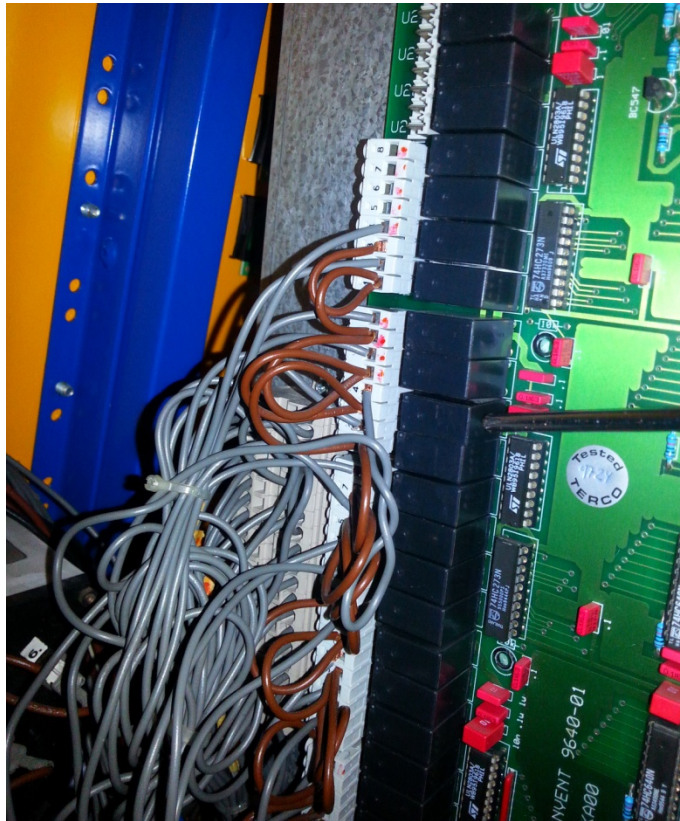


**Figura 30** - Ligadores que foram alvo de intervenção nos seccionadores S7 e S8, painel C6.

- d) Troca de relé na placa de controlo lógico PVAK22 localizada no painel C2.



O relé da placa de controlo lógico instalada no painel C2 tinha o relé número 14 avariado, sinalizado na figura 30. No passado, foi remediado o problema instalando um relé e base com as mesmas características da marca FINDER, colocado numa das prateleiras do painel C1.



**Figura 31** - Ligadores que foram alvo de intervenção nos seccionadores S7 e S8, painel C6.

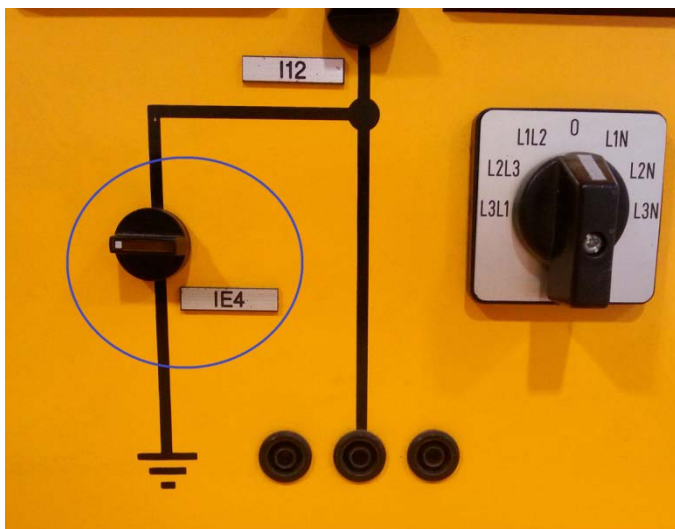
- e) Verificação total do circuito elétrico do simulador.

A verificação total do circuito elétrico do simulador foi levada a cabo por existirem ainda várias anomalias detetadas durante o seu funcionamento. Ainda não era possível executar as manobras de acordo com a sequência programada, sendo a situação mais grave, a que estava a acontecer no painel C8, pois chegou-se à conclusão de que não comunicava com a placa de controlo lógico.

- f) Substituição do botão que simula o seccionador de terras S10 (IE4) no painel C6.

Durante a verificação do circuito elétrico, descrito na alínea e), foi detetado um defeito no botão S10 (IE4) (figura 32) que tem a função de simular um seccionador de terras. O problema estava na lâmpada que sinaliza falsas manobras (lâmpada ligada) ou falta

de alimentação de energia elétrica (a lâmpada pisca). Chegou-se à conclusão de que era um dos contactos partido onde os terminais da lâmpada encaixam.



**Figura 32** - Seccionador alvo de troca, painel C8.

g) Substituição de todos os contactores existentes no simulador.

Com o circuito anteriormente analisado ao detalhe, mesmo assim continuaram a estar em falta sinais na placa de controlo lógico. Restavam apenas os contactores e os blocos de contactos auxiliares para análise e concluir se estes estavam a funcionar corretamente. Para a análise, desligaram-se todos os condutores que estavam ligados nestes, com exceção da alimentação da bobina (A+ e A-) para permitir ligar ou desligar o contactor. Com o auxílio de um multímetro, ligou-se o contactor e verificou-se se existia continuidade entre os contactos L1-T1, L2-T2, L3-T3, NO (13-14) e nos blocos de contactos auxiliares NO (53-54). Desligando-o, verificou-se a ligação NC do bloco de contactos auxiliares 61-62. A maioria destes equipamentos apresentava pelo menos um contacto com defeito. Nos casos mais graves, todos os contactos do contactor estavam em situação de defeito. No entanto, a avaria não foi fácil de detetar porque, devido a todas as bobinas dos contactores estarem a funcionar, levava a acreditar que o funcionamento destes era normal embora, na realidade existissem os defeitos descritos. Outra situação encontrada foi no bloco de contactos auxiliares, que devido às suas características de fabrico, o acoplamento entre este e o contactor era frágil e não garantia uma fixação eficaz, conforme se pode observar pela figura 33 o estado em que se encontrou alguns exemplares. Existiam situações em que estes estavam presos por fita isoladora para não se separarem.





**Figura 33** - Acoplamento defeituoso entre o contactor e o bloco de contactos auxiliares.

h) Disjuntores CB13 e CB14 em *flash mode*.

Apesar deste problema ser anterior à troca dos contactores, foi decidido apresenta-lo depois, porque, durante a fase da deteção de avarias, chegou-se à conclusão que o problema poderia estar nestes componentes.

i) Após a substituição dos contactores, as placas de controlo lógico PVAK22 do painel C2 e a PVAK2230 colocada no painel C6 apresentavam sinais de insuficiente alimentação de energia elétrica.

Este problema surgiu após a troca dos contactores porque, com a totalidade dos sinais elétricos a chegar agora na sua totalidade às placas de controlo lógico, a energia elétrica necessária ao seu bom funcionamento aumentou.

Manobrando os disjuntores e seccionadores para a posição de ligado nos painéis C1, C2, C3 e parte do painel C6, o simulador entrava em situação de falta de alimentação elétrica, levando à atuação da sinalização *flash lamp*. Pelas medições efetuadas nas placas de controlo lógico dos painéis C2 e C6, sendo estas alimentadas a 20 V, CC, verificou-se que só chegavam 19,2 V, CC, em vazio. Com as placas alimentadas, existe uma queda de tensão, o que provoca uma diminuição do valor de tensão para valores inferiores a 19,2 V, valores estes insuficientes para alimentar estas duas placas. Verificou-se que a fonte de alimentação para estas duas placas estava a ser partilhada com outros componentes, privando as placas da energia elétrica necessária ao seu funcionamento.

### 3.2 CORREÇÕES E AÇÕES CORRETIVAS

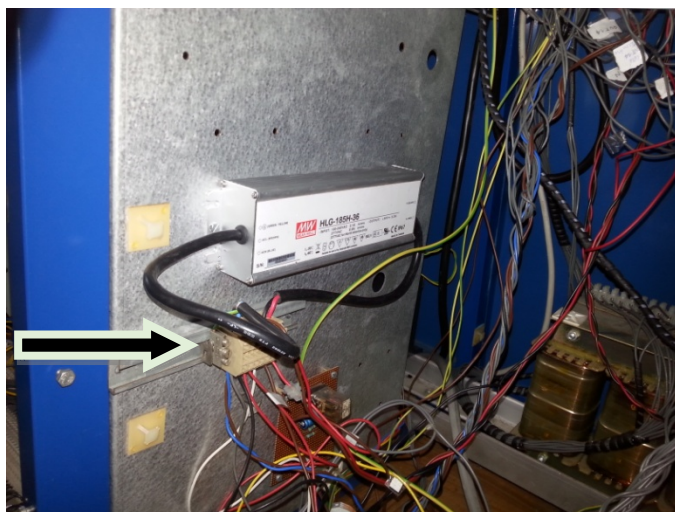
Após a identificação dos problemas, o passo lógico seguinte passou pelas necessárias correções e ações corretivas. A finalidade foi a de eliminar avarias e, quando necessário, adotar e/ou aconselhar medidas preventivas para que os problemas não voltem a repetir-se.

a) Falta de alimentação de energia elétrica dos diversos componentes elétricos.

Para resolver a situação, foi necessário identificar os diversos condutores que faziam parte do bloco de bornes, identificar os níveis de tensão e efetuar a ligação correta para garantir que os diferentes componentes fossem eletricamente alimentados. Servindo como exemplo: os relés de proteção, as placas de controlo lógico, que eram responsáveis pelo aparecimento do erro aqui referido, e as placas de medidas.

Esta ação permitiu que o simulador deixasse de apresentar o erro de falta de alimentação de energia elétrica, assinalada pelos disjuntores que sinalizam visualmente por uma lâmpada que pisca continuamente (*flash lamp*).

Para que esta situação não volte a ocorrer, escolheu-se uma localização para a colocação dos blocos de bornes no interior do módulo, o que garante uma maior proteção, conforme se pode verificar pela figura 34.



**Figura 34** - Nova localização dos blocos de contactos no interior do módulo.

b) Placa de medidas MM1 e MM2 pertencentes ao painel C1 parcialmente desligadas.

Para resolver o problema, e com a ajuda do esquema elétrico, tratou-se primeiro da placa MM1. Ligou-se aos pinos da placa os fios correspondentes e da mesma maneira,

tratou-se de resolver os problemas encontrados na placa MM2. No final ligou-se o simulador e executou-se um teste para verificar se todos os mostradores digitais estavam a funcionar. Por esta altura, não se podia ainda ter a noção se as leituras eram as mais corretas, mas com o decorrer do tempo, verificou-se que não são leituras com a precisão desejada. Serve como exemplo, o valor apresentado pelo medidor da velocidade angular ao eixo que liga o motor ao gerador, que apresenta um erro de aproximadamente 250 a 300 rotações por minuto (r.p.m.), que percentualmente corresponde a cerca de 20%, em relação ao que é indicado pelo variador de velocidade.

c) Diversos condutores elétricos desligados.

A solução para todos os problemas encontrados passou pela religação de todos os condutores que se encontravam desligados, com a preocupação de consultar os esquemas elétricos existentes, para atestar da correta ligação dos mesmos.

Como meio de prevenção, pois foi constatado que a operação de ligar/ desligar dos contactores promoviam vibrações, com consequências diretas no aperto dos parafusos existentes nos contactores e nos blocos de contactos auxiliares, foi feito um reaperto aos mesmos, bem como a todos os outros parafusos dos vários equipamentos presentes no simulador, para eliminar mais uma causa possível de avaria.

Para evitar a repetição do desaperto dos parafusos, recomenda-se que se efetue anualmente um reaperto dos mesmos.

d) Troca de relé na placa de controlo lógico PVAK22 localizada no painel C2.

Para solucionar a situação, à placa de controlo lógico, retirou-se o relé número 24, que pertence a uma entrada/ saída não usada e efetuou-se troca pelo 14, que se pode ver na figura 35. É uma situação provisória, pois quando for adquirido um outro relé de substituição, é conveniente instala-lo na posição 24, para devolver todas as funções originais à placa.



**Figura 35** - Relé avariado da placa de controlo lógico PVAK22.

Após a troca do relé e colocação da placa no devido local, foi necessário refazer a ligação elétrica, voltando a ligar o circuito, que estava anteriormente ligado ao relé FINDER, à placa de controlo lógico PVAK22.

- e) Verificação total do circuito elétrico do simulador.

Com o esquema elétrico existente no laboratório, fez-se uma análise painel a painel de todo o circuito elétrico, com a ajuda de um multímetro para as situações em que se não conseguia seguir visualmente onde os condutores iam ligar. Não foram detetadas quaisquer anomalias durante este processo, com exceção do que se vai relatar na alínea f).

- f) Substituição do botão que simula o seccionador de terras S10 (IE4) no painel C6.

Tratou-se de substituir esse botão, que simula um seccionador de terras, por um novo. Com um ferro de soldar a estanho, desligou-se os condutores elétricos e voltaram-se a soldar de novo. Executou-se um teste para garantir que tudo estava a funcionar devidamente. Para o teste à lâmpada do botão mencionado, bastou acionar o botão *L-TEST*, presente no painel C1, que executa um teste a todas as lâmpadas incluídas no simulador.

- g) Substituição de todos os contactores existentes no simulador.

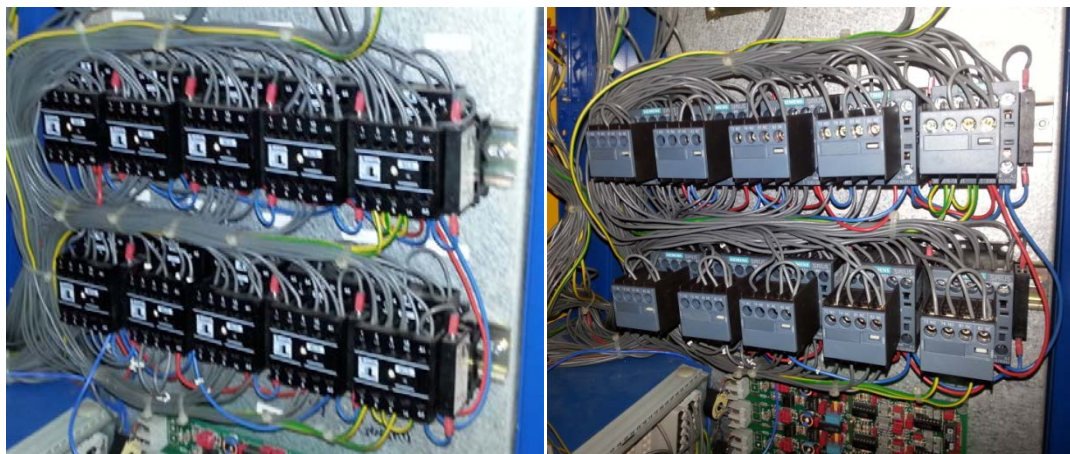
Depois de detetados os defeitos, procurou-se saber o porquê da situação. Desmontou-se um contactor e um bloco de contactos auxiliares para análise. Com este método foi

fácil concluir que os contactos de metal internos apresentavam oxidação, levando a que não fosse possível fechar o circuito e conduzir os sinais necessários à placa de controlo lógico. Esta situação está demonstrada pela figura 36.



**Figura 36** - Contactos internos em metal do contactor oxidados.

Por essa razão, foi acordado que se deviam substituir todos os contactores e blocos de contactos auxiliares. Foi feita uma consulta a fornecedores para a escolha da melhor relação preço/qualidade e, após a seleção da melhor oferta e compra, levou-se a cabo a sua substituição. Escolheu-se os de marca Siemens em detrimento da marca anterior, demonstrada na figura 37. Esta operação permitiu também resolver o problema do acoplamento entre contactor/ bloco de contactos auxiliares porque a nova solução é mecanicamente muito mais robusta do que a original.



a)

b)

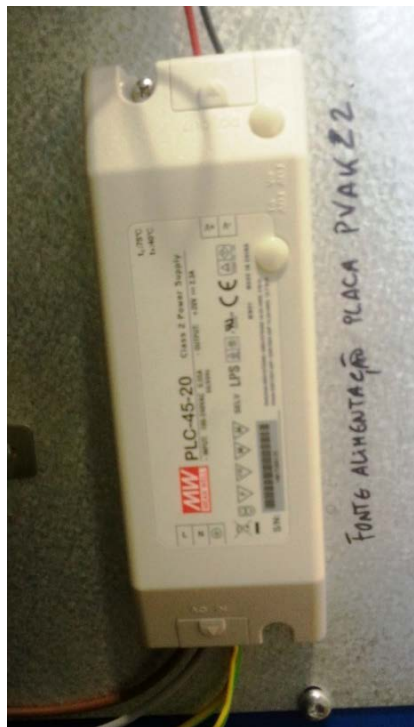
**Figura 37** - Contactores e bloco de contactos auxiliares a) antigos b) novos.

h) Disjuntores CB13 e CB14 em *flash mode*.

O problema foi resolvido com a troca do conjunto contactor/ bloco de contactos auxiliares, de acordo com o que era esperado, porque já se tinha chegado à conclusão sobre as causas da avaria.

- i) Após a substituição dos contactores, as placas de controlo lógico PVAK22 do painel C2 e a PVAK2230 colocada no painel C6 apresentavam sinais de insuficiente alimentação de energia elétrica.

Como já referido anteriormente, a troca dos contactores levou a que a informação que segue para as duas placas de controlo lógico seja de facto recebida na sua totalidade. Como tal, a quantidade de informação a ser processada em cada placa requer uma maior alimentação de energia elétrica, o que não acontecia. A solução para o problema apresentado passou pela requisição e instalação de duas fontes de alimentação de 20 V, DC (ver figura 38) para a alimentação individual de cada placa.



**Figura 38** - Fonte de alimentação instalada no painel C2 para a alimentação individual da placa de controlo lógico.

### 3.3 RESUMO

As falhas que foram detetadas e que comprometiam o funcionamento do simulador TERCO foram todas debeladas e o simulador voltou a funcionar conforme o desejável. No entanto, existe pelo menos uma situação de defeito que não foi solucionada, não afeta o funcionamento do equipamento, mas desliga o interruptor diferencial no quadro parcial Q. PSI 107 instalado no Laboratório de Sistemas de Energia, quando se liga o contactor



CBM1, que por sua vez liga o variador de velocidade. O defeito não se manifesta sempre, o que está a dificultar a deteção da causa.

Também pequenos melhoramentos de pormenor foram entretanto introduzidos, referindo como exemplo, a fixação à estrutura do simulador dos bornes de alimentação (ver figura 27) e a fonte de alimentação de 36V, CC do painel C1, que se encontravam colocadas no chão. Outro exemplo, a colocação de um interruptor de corte de alimentação das placas de controlo lógico, que, se por algum motivo o simulador for privado da alimentação elétrica da rede e a religação ocorrer num espaço de tempo curto, os muitos condensadores existentes continuam a alimentar a memória das placas e os sinais vindos dos seccionadores e disjuntores ainda se mantêm. Esta situação origina uma situação de erro na memória interna. Acionando o interruptor de corte de alimentação da(s) placa(s), executa um *reset* e anula os erros existentes. Esta situação não acontece com frequência e não é habitual suceder às duas placas simultaneamente.

## 4. Descrição das manobras

Nos sistemas elétricos de energia (SEE), o objetivo essencial é a satisfação das necessidades de energia elétrica dos consumidores. Para ser um SEE bem concebido deve satisfazer os seguintes requisitos: a produção em cada instante deve igualar o consumo (mais as perdas), porque a energia elétrica não pode ser armazenada e esta deve ser fornecida em qualquer local onde seja solicitada. A energia elétrica deve obedecer a critérios de qualidade que estão bem definidos:

- Forma de onda sinusoidal;
- Custos económicos tão baixos quanto possível;
- Valores da tensão, frequência e fiabilidade dentro de certos limites;
- Segurança de pessoas e equipamentos;
- Custos ecológicos minimizados.

Num SEE, e no simulador em estudo, tem de se ter em consideração às cargas, que são componentes que absorvem energia de uma rede elétrica e caracterizam-se pela sua potência, pela sua simetria (monofásica ou trifásica), pela sua dependência em relação ao tempo, à frequência e à tensão e pelo tipo de uso (regular ou aleatório). Num SEE, as cargas de um modo geral, obedecem aos seguintes princípios:

- Individualmente podem ser aleatórias mas ao nível do transporte são facilmente previsíveis;
- Embora o valor de cada carga varie com o tempo, as variações do conjunto de cargas de uma rede são relativamente lentas;
- Variam com o tempo de uma forma previsível. Os seus valores dependem de um conjunto de fatores, como a hora do dia, o dia da semana, condições meteorológicas, etc...;
- Variam com o tempo de uma forma previsível. Os seus valores dependem de um conjunto de fatores, temporais e climáticos;
- Os fatores temporais relacionam-se com a periodicidade diária, semanal e sazonal, períodos de férias e tendências de crescimento (ou diminuição) anual.



- Os fatores climáticos relacionam-se com as condições meteorológicas, como a temperatura, a humidade, a visibilidade e a velocidade do vento;
- Os fatores aleatórios são devidos à própria natureza estatística das cargas, a acontecimentos especiais e a avarias inesperadas.

Nos SEE as cargas, de um modo geral, obedecem aos subsequentes princípios:

- Uma carga típica consome sempre energia reativa;
- Uma carga típica é sempre simétrica. Nos motores trifásicos a simetria é automática. Nas cargas monofásicas a simetria resulta de uma distribuição intencional das cargas pelas três fases.

A gestão dos sistemas elétricos de energia baseia-se na:

- Monitorização do sistema;
- Controlo sobre a rede, permitindo o comando de disjuntores, seccionadores, condensadores, tomadas dos transformadores, reguladores de tensão dos geradores e mecanismos de controlo e automação existentes nas instalações;
- Despacho económico;
- Controlo automático da produção (AGC);
- Escalonamento dos Geradores (*Unit Commitment*);
- Estimação de estado;
- Trânsito de potências em tempo real, usando os dados obtidos pelo sistema SCADA;
- Controlo automático tensão/ potência reativa;
- Monitorização e análise de segurança;
- Previsão de cargas;
- Controlo de emergência;
- Reposição automática de serviço;
- Simulador de treino. [20]

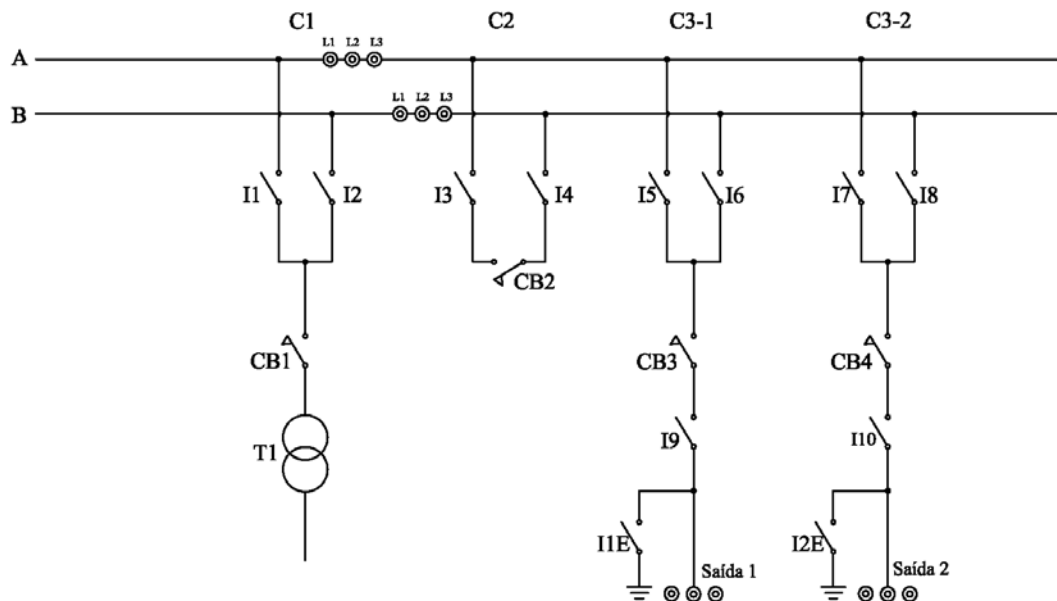
Quanto às manobras, estas são ações que se destinam a realizar mudanças de esquema de exploração ou, a cada momento, efetuar o equilíbrio entre a produção e o consumo, ou ainda regular os níveis de tensão ou a produção de energia reativa. Servem ainda para consignar instalações para trabalhos. Estas obedecem a uma ordem específica: primeiro identifica-se a

instalação e o passo seguinte passa pela identificação do painel e da saída. Quanto à sua classificação, estas podem ser voluntárias programadas quando se está perante a execução de trabalhos efetuados com antecedência, voluntárias não programadas quando se está a executar manobras de rede, como por exemplo, uma transferência de cargas de uma subestação para outra. São consideradas manobras involuntárias as que são causadas por perturbações na rede, por exemplo, um curto-circuito, e que leva à atuação das proteções ou por falsas manobras executadas pelos técnicos responsáveis pela exploração da rede elétrica.

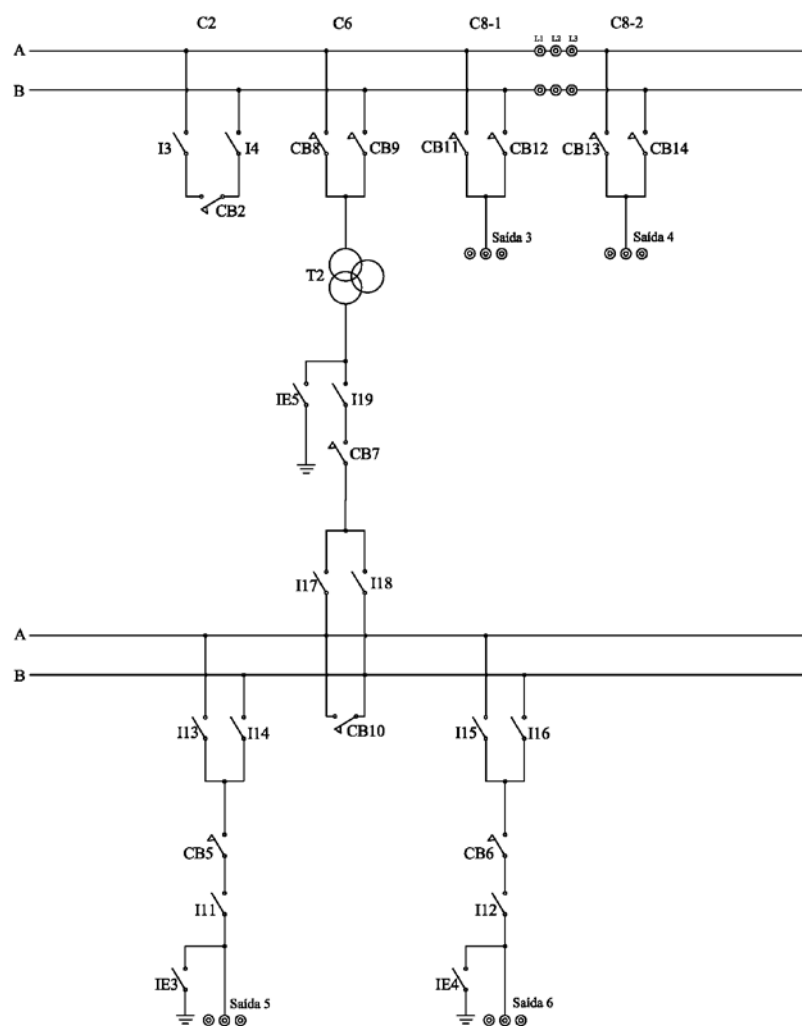
No caso das manobras aqui descritas, elas estão condicionadas pela simplicidade de construção do simulador. Neste, deveriam ter sido incluídos pelo menos os seccionadores de *by-pass* aos disjuntores, pois, no caso de uma avaria neste órgão de proteção, é obrigatório cortar o abastecimento às cargas na situação com menor gravidade. No pior cenário, no painel C1, caso avarie o disjuntor CB1, a instalação fica totalmente fora de serviço.

#### **4.1 MANOBRAS POSSÍVEIS DE SEREM EXECUTADAS**

Nesta secção apresentam-se as manobras possíveis de realizar no simulador. O atual estado do simulador permite efetuar 6 planos de manobras (PM) descritas neste capítulo. Os esquemas unifilares representados nas figuras 39 e 40 auxiliam no acompanhamento visual da sequência de manobras efetuada. Os painéis estão identificados pela letra C, a letra I identifica os seccionadores, a letra T identifica os transformadores e CB são os disjuntores.



**Figura 39** - Esquema unifilar da subestação elevadora do simulador.



**Figura 40** - Esquema unifilar da subestação abaixadora (AT para MT) do simulador.

- **Plano de Manobras 001 - Transferência de um painel AT do barramento A para o barramento B**

Pretende-se transferir a saída 1 do painel C3-1 do barramento A para o barramento B. Supondo que a exploração dos painéis C1, C3-1 e C3-2 estão ligadas ao barramento A.

1. No painel C2, confirmar que o disjuntor CB2 do paralelo de barras está desligado;
2. No painel C2, confirmar que o seccionador I3 do paralelo de barras está aberto;
3. No painel C2, confirmar que o seccionador I4 do paralelo de barras está aberto;
4. No painel C3-1, confirmar que o seccionador I6 está aberto;
5. No painel C2, fechar o seccionador I3 do paralelo de barras;
6. No painel C2, fechar o seccionador I4 do paralelo de barras;
7. No painel C2, ligar o disjuntor CB2 do paralelo de barras;
8. No painel C3-1, fechar o seccionador I6 da saída 1;
9. No painel C3-1, abrir o seccionador I5 da saída 1;
10. No painel C2, desligar o disjuntor CB2 do paralelo de barras;
11. No painel C2, abrir o seccionador I4 do paralelo de barras;
12. No painel C2, abrir o seccionador I3 do paralelo de barras.

- **Plano de Manobras 002 - Isolamento e ligação à terra de uma linha AT**

Pretende-se isolar e ligar à terra uma linha AT. Vai ser apresentado o exemplo do painel C3-2, saída 2.

Nota: Antes de se efetuar qualquer manobra, confirmar que as cargas afetas a esta saída 2 são transferidas para o painel C3-1.

1. No painel C3-2, desligar o disjuntor CB4.
2. No painel C3-2, confirmar que a linha está sem tensão.
3. No painel C3-2, abrir o seccionador de isolamento da linha (I10) da saída 2.
4. No painel C3-2, fechar o seccionador de terra I2E da linha da saída 2.

- **Plano de Manobras 003 - Unificação de barramentos AT (Subestações equipadas com barramento AT simples seccionável ou duplo)**

Nesta simulação vai-se unificar os barramentos A e B. Supondo que a exploração dos painéis C1, C3-1 e C3-2 estão ligadas ao barramento B.

1. No painel C2, confirmar que o disjuntor CB2 do paralelo de barras está desligado;
2. No painel C2, confirmar que o seccionador I3 do paralelo de barras está aberto;
3. No painel C2, confirmar que o seccionador I4 do paralelo de barras está aberto;
4. No painel C2, fechar o seccionador I3 do paralelo de barras;
5. No painel C2, fechar o seccionador I4 do paralelo de barras;
6. No painel C2, ligar o disjuntor CB2 do paralelo de barras.

- **Plano de Manobras 004 - Transferência de cargas entre os barramentos AT**

Manobras a efetuar para transferir as cargas de todos os painéis do barramento A para o barramento B:

Nota: A exploração está a ser feita com todos os painéis supostamente explorados pelo barramento A.

1. No painel C2, confirmar que o disjuntor CB2 do paralelo de barras está desligado;
2. No painel C2, confirmar que o seccionador I3 do paralelo de barras está aberto;
3. No painel C2, confirmar que o seccionador I4 do paralelo de barras está aberto;
4. No painel C2, fechar o seccionador I3 do paralelo de barras;
5. No painel C2, fechar o seccionador I4 do paralelo de barras;
6. No painel C2, ligar o disjuntor CB2 do paralelo de barras;
7. No painel C1 fechar o seccionador I2;
8. No painel C1 abrir o seccionador I1;
9. No painel C3-1 fechar o seccionador I6;
10. No painel C3-1 abrir o seccionador I5;
11. No painel C3-2 fechar o seccionador I8;
12. No painel C3-2 abrir o seccionador I7;

13. No painel C2, desligar o disjuntor CB2 do paralelo de barras;
14. No painel C2, abrir o seccionador I3 do paralelo de barras;
15. No painel C2, abrir o seccionador I4 do paralelo de barras.

- **Plano de Manobras 005 - Isolamento e ligação à terra de um barramento AT/MT (Subestações equipadas com barramentos duplos)**

Pretende-se com as seguintes manobras, isolar e ligar à terra um barramento, neste caso o barramento B, AT/MT de uma Subestação equipada com barramento duplo no andar em questão.

1. Confirmar que todos os painéis AT e T1 estão ligados ao barramento A, (no caso de existirem painéis a serem alimentados pelo barramento a isolar, executar as manobras descritas no Plano de Manobras (001) aplicáveis para a transferência de cargas entre barramentos e;
2. No painel C2, confirmar que o disjuntor CB2 do paralelo de barras está desligado;
3. No painel C2, confirmar que o seccionador I3 do paralelo de barras está aberto;
4. No painel C2, confirmar que o seccionador I4 do paralelo de barras está aberto;
5. No painel C1, confirmar que o seccionador I2 está aberto;
6. No painel C3-1, confirmar que o seccionador I6 está aberto;
7. No painel C3-2, confirmar que o seccionador I8 está aberto;
8. Confirmar a ausência de tensão no barramento B;
9. Colocar terras amovíveis no barramento B.

- **Plano de Manobras 006 - Isolamento e ligação à terra de um transformador de potência**

Manobras a efetuar para isolar e ligar à terra um transformador de potência de uma SE, cujos andares MT e AT têm uma configuração representada na figura 40:

Nota: Garantir a transferência de cargas afetas aos barramentos MT de A e B.

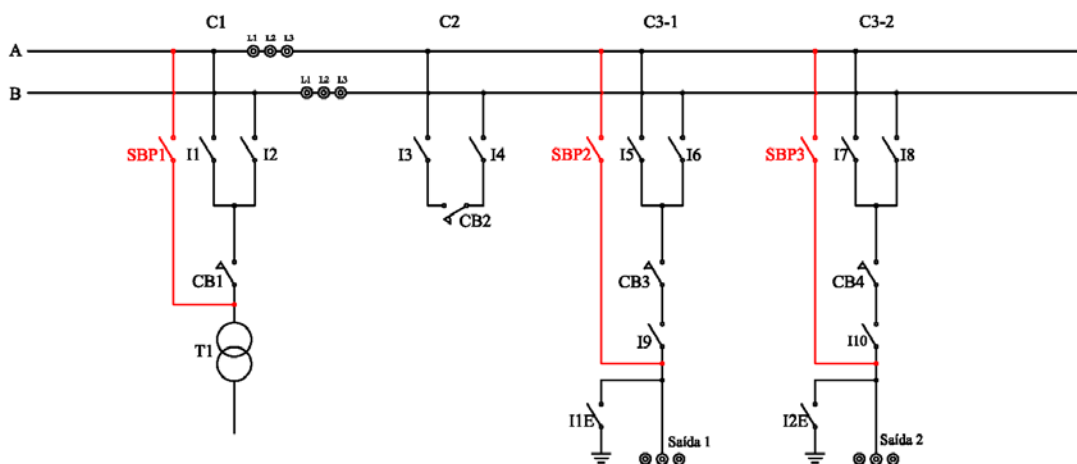
1. No painel C6, confirmar que o seccionador (I17 e/ou I18) está aberto.
2. No painel C6, confirmar que está garantida a alimentação das cargas afetas ao TP a isolar;

3. No painel C6, desligar o disjuntor MT (CB7) do TP a isolar;
4. No painel C6, desligar o(s) disjuntor(es) AT (CB8 e/ou CB9) do barramento do TP a isolar;
5. No painel C6, abrir o(s) seccionador(es) MT (I17 e/ou I18) de barramento do TP a isolar;
6. No painel C6, abrir o seccionador I19;
7. No painel C6, fechar o seccionador de terras (IE5) caso a natureza dos trabalhos o exija.

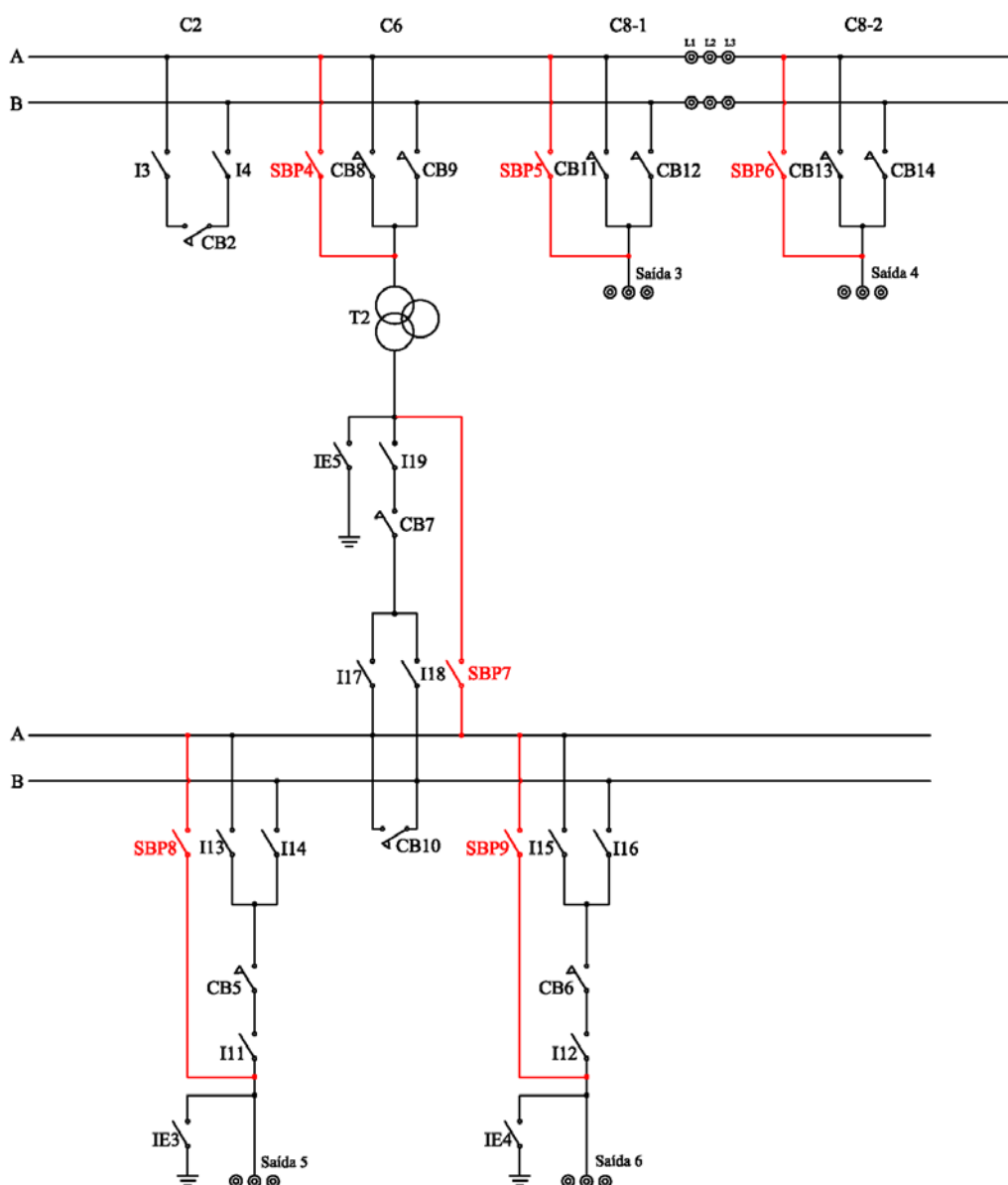
## 4.2 MANOBRAS POSSÍVEIS DE SEREM EXECUTADAS APÓS ALTERAÇÕES AO SIMULADOR

Existe a possibilidade de fazer um melhoramento ao simulador para permitir simulações mais aproximadas às executadas pelas empresas que controlam a distribuição e o transporte da energia elétrica. Academicamente, as vantagens são enormes, pois possibilita aos alunos aumentarem os seus conhecimentos, e posteriormente, quando chegarem ao mercado de trabalho, não serem negativamente surpreendidos.

O proposto passa pela adição de seccionadores de *by-pass* no barramento A ou no barramento B, conforme é demonstrado na figura 41 e 42, para que a maioria das situações encontradas na realidade possam ser transpostas para o simulador.



**Figura 41** - Esquema unifilar da subestação elevadora do simulador, com os *by-pass* sugeridos.



**Figura 42** - Esquema unifilar da subestação abaixadora (AT para MT) do simulador, com os *by-pass* sugeridos.

- **Plano de Manobras 007 - Pannel de uma linha em *by-pass***

Manobras a efetuar num pannel AT (vai ser utilizado o pannel C3-1 como exemplo) com recurso ao seccionador de *by-pass*.

Nota: Se os painéis das linhas AT e do T1 não estiverem a ser explorados pelo barramento B, efetuar o plano de manobras 004 (PM 004) para a mudança de barramento de um pannel AT.



1. Confirmar que todos os painéis de linha AT e painel do T1 estão a se explorados pelo barramento B;
2. No painel C2, confirmar que o disjuntor CB2 do paralelo de barras está desligado;
3. No painel C2, confirmar que o seccionador I3 do paralelo de barras está aberto;
4. No painel C2, confirmar que o seccionador I4 do paralelo de barras está aberto;
5. No painel C2, fechar o seccionador I3 do paralelo de barras;
6. No painel C2, fechar o seccionador I4 do paralelo de barras;
7. No painel C2, ligar o disjuntor CB2 do paralelo de barras;
8. No painel C3-1, fechar o seccionador *by-pass* SBP2;
9. No painel C2, desligar o disjuntor CB3;
10. No painel C2, abrir o seccionador de isolamento da linha I9;
11. No painel C2, abrir o seccionador de barramento I5.

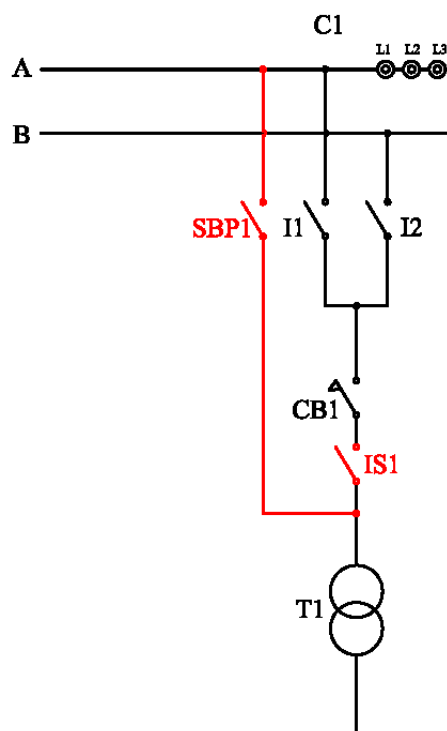
Para repor o painel na exploração normal, deve ser invertida a sequência das manobras.

### 4.3 OUTRAS ALTERAÇÕES PROPOSTAS AO SIMULADOR

Como anteriormente referido, este simulador é limitado no que refere às opções de manobras. Os seccionadores de *by-pass* sugeridos vão resolver muitas situações, que sem estes, era impossível garantir a continuidade de serviço na grande maioria dos painéis. Assim, vai-se identificar quais as correções a implementar para garantir uma continuidade de serviço mais eficaz e deste modo aumentar a qualidade de serviço do simulador.

- **Painel C1**

Este painel tem grandes limitações. Se o disjuntor CB1 avariar ou se tiver necessidade de uma intervenção de manutenção, com a configuração atual do simulador, vai ser impossível alimentar as cargas. Para corrigir a situação, para além da instalação do seccionador de *by-pass* SBP1, ficando a proteção ao transformador elevador do lado da central de produção, deve-se instalar outro seccionador IS1 de isolamento entre a derivação do seccionador *by-pass* e o disjuntor CB1. A figura 43 mostra o local exato da instalação do IS1, que está desenhado a vermelho.

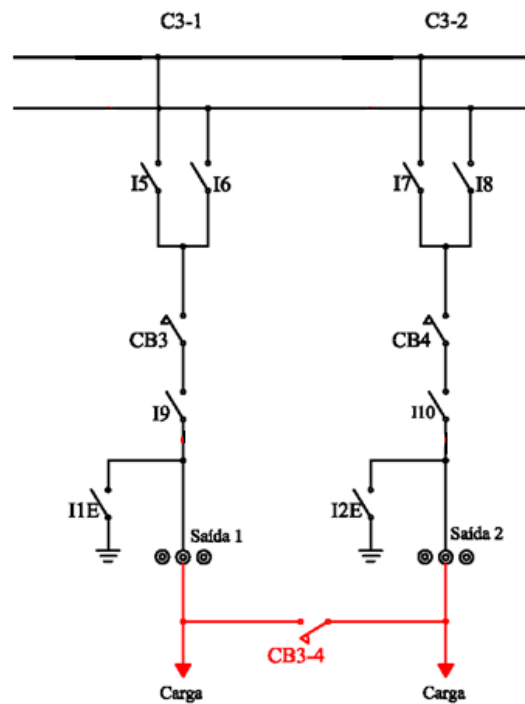


**Figura 43** - Instalação do seccionador de isolamento IS1 e do seccionador de *by-pass*.

Nesta situação, o seccionador de *by-pass* permite a continuidade de serviço e o seccionador de isolamento IS1 isola o disjuntor para reparação ou manutenção. Assim cumpre-se uma das 5 regras de ouro das consignações que é o corte visível.

- **Painéis C3-1, C3-2**

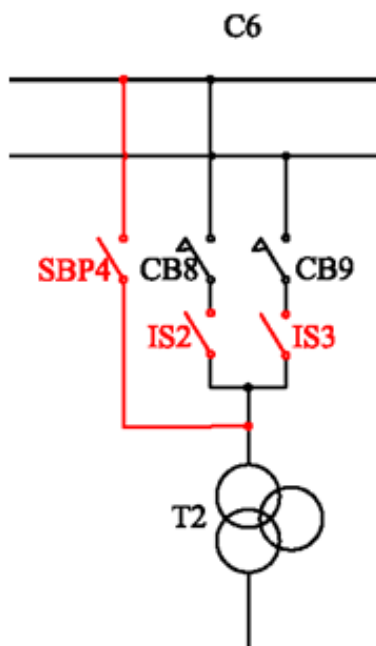
Sem o seccionador de *by-pass* instalado e na eventualidade de acontecer uma avaria num dos seccionadores ou disjuntores CB3 e CB4, que comandam a saída 1 e a saída 2 respetivamente, as cargas que estas linhas asseguram, ficam sem a possibilidade de fornecimento de energia elétrica. A solução encontrada, e assinalada na figura 443, passa pela instalação de um disjuntor *shunt* entre as linhas de saída 1 e saída 2 e a montagem de um disjuntor na saída *shunt*, que quando ligado, interliga as duas linhas de saída. Assim pode ser feito o abastecimento das cargas pela saída que está operacional, caso as linhas comportem o aumento da carga.



**Figura 44** - Interligação das saídas 1 e 2.

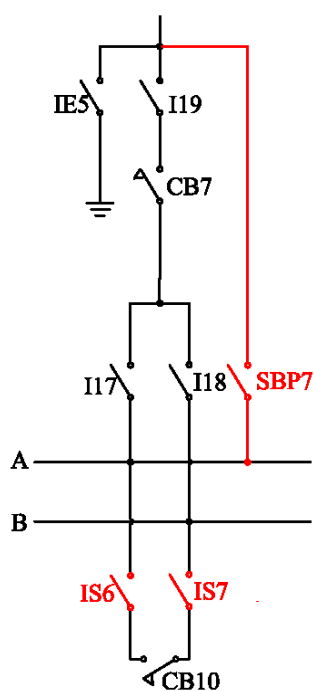
- **Painel C6**

No caso de um ou ambos os disjuntores avariarem, não há a possibilidade de fazer a reparação do(s) disjuntor(es) sem a existência do seccionador para possibilitar o isolamento do painel e garantir o corte visível. Assim, aconselha-se a instalação de dois seccionadores entre o disjuntor CB8 e o transformador T2 e o outro entre o disjuntor CB9 e o transformador.



**Figura 45** - Instalação dos dois seccionadores IS2 e IS3.

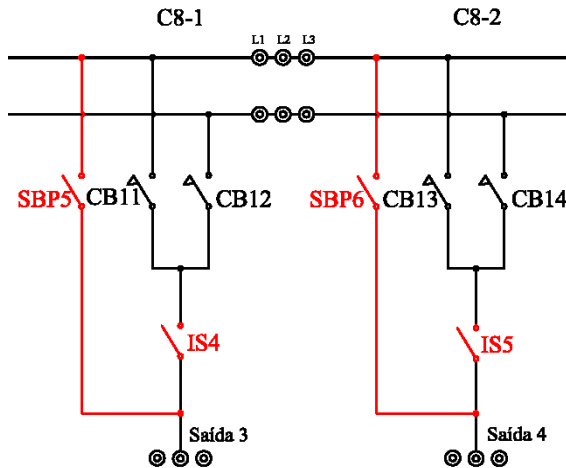
Na mesma situação também se encontra o disjuntor CB10, pois em caso de avaria, não existe a garantia de isolamento do disjuntor e a garantia de um corte visível para a intervenção ao disjuntor. O corte visível serve para garantir aos técnicos, que vão efetuar a reparação, de que o painel está isolado e que é seguro iniciar os trabalhos. A solução é a mesma à da situação anterior.



**Figura 46** - Instalação dos dois seccionadores IS6 e IS7.

- **Painel C8**

Para se isolar e garantir um corte visível, em cada saída do painel C8, deve ser instalado um seccionador de isolamento na posição indicada na figura 47.



**Figura 47** - Instalação de um seccionador por cada saída: IS4 e IS5.

#### 4.4 RESUMO

Todo este capítulo foi dedicado à descrição das manobras e medidas de melhoramento destas. Foram descritas as manobras que atualmente são possíveis de realizarem-se, no entanto estas são extremamente básicas e académicas. Para otimizar o equipamento, estão propostas alterações ao *hardware*, com o objetivo de o aproximar à realidade encontrada na rede elétrica nacional. As alterações sugeridas, numa primeira fase, passam pela introdução de seccionadores de *by-pass*. Numa segunda fase, na eventualidade de existir o interesse de se evoluir ainda mais as capacidades deste equipamento, no ponto 4.3 deste capítulo, foram estudadas localizações para a inclusão de outros seccionadores que melhorarão substancialmente a qualidade de serviço e promovem a segurança porque, como se sabe, a primeira das cinco regras de ouro dos trabalhos fora de tensão aconselha a efetuar cortes visíveis. Como complemento, enuncia-se as outras quatro regras: bloquear os aparelhos de corte, verificar a ausência de tensão, estabelecer ligações à terra e em curto-circuito e delimitar a zona de trabalhos.

# 5. Propostas de guiões para o Laboratório de Sistemas de Energia

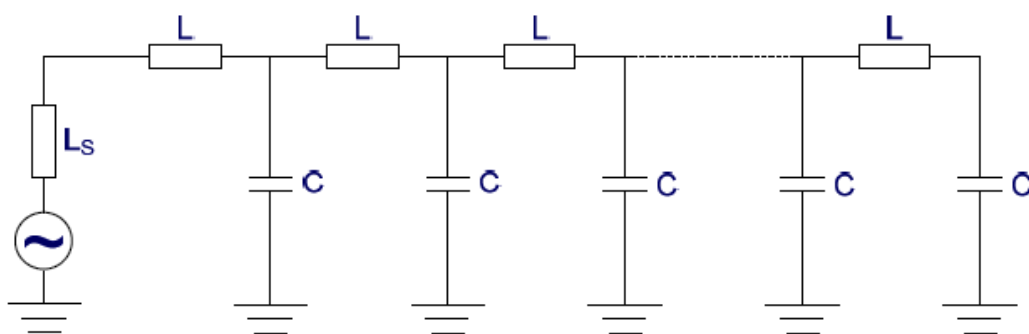
Um dos objetivos desta dissertação é a elaboração de guiões de trabalhos possíveis de desenvolver no simulador TERCO, e nesse sentido foram desenvolvidos 4 guiões que poderão ser utilizados no âmbito das Unidades Curriculares de SELE 1 e SELE 2. Pretende-se que estes guiões sejam um apoio para docentes e alunos.

Em cada guião está presente uma descrição detalhada, esquemas de montagem criados de raiz para os trabalhos e adicionado um enquadramento teórico da matéria a estudar.

Todos os trabalhos foram previamente testados, com o propósito de assegurar e definir os valores máximos de tensão e intensidade de corrente admitida pelo simulador. Assim, assegura-se que as experiências propostas têm condições de serem executadas.

## 5.1 GUIÃO "VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DO EFEITO *FERRANTI*"

Com este guião pretende-se, de modo experimental, estudar o aumento da tensão ao longo de uma linha longa quando esta se encontra alimentada numa extremidade e na outra encontra-se aberta. Este efeito é conhecido por Efeito *Ferranti*.



**Figura 48** - Representação de uma linha. [22]

A representação da linha, que se pode ver pela figura 48, é definida pelas suas constantes: indutâncias e capacidades, que podem ser imaginadas como constituído por uma ligação entre células elementares, isto é, capacidades em paralelo e indutâncias em série.

Cada célula estabelece um circuito ressonante, sendo o ganho ligeiramente superior à unidade. Quanto maior for o número de células, o que se traduz num comprimento de linha, maior será o ganho na sua extremidade. Assim a tensão será mais elevada no extremo da linha quanto maior for o comprimento desta. [21]

Para a preparação do guião, foram feitos testes com os 4 modelos de linhas existentes, para determinar a viabilidade de cada uma. Concluiu-se que, apesar da linha de 100 km ser considerada uma linha média, o modelo apresentado não suportava uma tensão de alimentação composta à entrada superior a 125 V. O valor medido no fim da linha ultrapassava os 600 V, o que tornava a medição impossível com os voltímetros presentes no laboratório, que são limitados a 600 V. Os relés de proteção do simulador também estão limitados a uma intensidade de corrente de 1,8 A por fase, embora esta limitação vá ser anulada futuramente, pois a afinação das proteções está prevista para uma data a agendar. O objetivo dessa afinação passa por aumentar a intensidade de corrente de disparo das proteções para os 3,0 A. Assim vai ser possível o aumento da tensão na linha. Também é garantida a seletividade da instalação, porque a montante o circuito, este está protegido por fusíveis de 4 A.

É importante resolver o problema das linhas de 100 km para proporcionar um modelo funcional, que permita injetar à entrada tensões até aos 400 V. Dever-se-á retirar e testar cada condensador individualmente, pois deve-se ter em atenção ao historial deste simulador, porque no passado este já foi testado intensivamente e levado ao limite das capacidades e talvez mais além (tem sinais evidentes desses testes numa das placas de medidas) e por último, se todos os condensadores estiverem em perfeito estado de funcionamento, redimensionar o valor da capacidade dos condensadores para o valor da tensão pretendida. Aspira-se a aproximar o Efeito *Ferranti* da realidade encontrada na rede de transporte e distribuição de energia elétrica.

O guião para este trabalho encontra-se no anexo A.

## **5.2 GUIÃO " SISTEMA TRIFÁSICO COM CARGAS R, L E C "**

Como é largamente do conhecimento eletrotécnico, atendendo ao tipo de circuito, a tensão e a corrente poderão não estar em fase. Assim, com este guião pretende-se estudar o comportamento da tensão, da intensidade de corrente e do fator de potência dos três tipos de cargas separadamente e retirar conclusões acerca do comportamento de um circuito

predominantemente resistivo, capacitivo e indutivo. Para cada carga, aconselha-se a construção de um gráfico para auxiliar o estudo do comportamento da tensão em relação à corrente.

O problema das cargas resistivas instaladas no simulador está detalhado no ponto 5.3, embora, se a situação atual for devidamente explorada, e sabendo que as cargas resistivas na sua grande maioria não são puras, aproximam os dados recolhidos à realidade encontrada nos consumidores.

O guião para este trabalho encontra-se no anexo B.

### **5.3 GUIÃO " COMPENSAÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA NUM SISTEMA DE ENERGIA "**

O guião "Compensação do fator de potência num sistema de energia" pretende, de um modo experimental, estudar a forma de compensar um circuito elétrico a consumir energia reativa. Como é do conhecimento geral, a energia reativa superior a tangente  $\phi$  igual a 0,3 é paga, com exceção dos clientes de Baixa Tensão, e a forma de o evitar é, localmente, na própria instalação consumidora, “produzir” a potência reativa necessária ao funcionamento da mesma com um fator de potência “aceitável”.

No guião, pretende-se, ainda, verificar o desfasamento entre a tensão e a intensidade de corrente e estudar os tipos de compensação do fator de potência.

A energia ativa é necessária para produzir trabalho, por exemplo, a rotação do eixo do motor, a reativa é necessária para produzir o fluxo magnético indispensável ao funcionamento dos motores, transformadores, etc. No entanto, a energia reativa "ocupa espaço" no sistema que poderia ser usado por mais energia ativa, e aumenta as perdas nas redes de distribuição e nas instalações de utilização, pelo que deve ser controlado o seu consumo. [22]

Assim, para os testes para este guião foram comprometidos pela utilização por parte do fabricante de resistências com uma componente indutiva. Isto é, como não é uma resistência puramente resistiva, com o  $\cos \phi = 1$  mas sim aproximadamente igual a 0,92 (foi feito o teste num aparelho analógico). A solução encontrada passa por colocar em série com cada resistência num condensador para anular o efeito indutivo (solução mais económica). No que se refere às cargas indutivas e capacitivas, foi possível verificar que para cada escalão de carga capacitiva, com a mesma carga indutiva esta anulava o efeito



capacitivo e o contrário também se verificou, o que demonstra que as cargas indutivas e capacitivas estão bem dimensionadas, embora mais uma vez se realce a utilização de um aparelho de medição analógico para analisar o fator de potência.

Para tornar mais apelativa a simulação, pode-se experimentar a compensação total e a compensação parcial. Utilizando um módulo de cargas capacitivas móvel, como as que existem no Laboratório de Máquinas Elétricas (I106), ligar as capacidades ao barramento existente no painel C10 do simulador. Para simular a compensação total, ligam-se as cargas indutivas do simulador e faz-se a compensação no barramento através do módulo capacitivo até ao fator de potência ser aproximadamente igual a 1. A compensação parcial é feita pelas cargas do simulador, isto é, no local da instalação. Liga-se um módulo indutivo ao barramento, para simular o consumo de potência reativa e a compensação faz-se localmente, através das cargas capacitivas do simulador.

O guião para este trabalho encontra-se no anexo C.

#### **5.4 GUIÃO " MEDIÇÃO DAS COMPONENTES HARMÓNICAS DAS ONDAS DE CORRENTE E DE TENSÃO "**

Para este guião ser viável, foi necessário proceder a alterações ao simulador. Estas alterações surgiram, acima de tudo, pela necessidade de um novo método de estudo dos harmónicos, pois o antigo sistema de testes existente no Laboratório de Sistemas de Energia avariou. Foi detetada, pelo responsável pelo Laboratório de Sistemas de Energia, que a lâmpada de descarga de iódetos metálicos de 2 000 W não estava a funcionar. Assim, apesar das precauções tomadas pelos docentes durante os ensaios, mesmo assim este trabalho apresentava algumas desvantagens, pois o fluxo luminoso da lâmpada ser bastante intenso para a vista humana e na eventualidade de, acidentalmente, se estabelecer contacto visual direto com a lâmpada, esta ação poder causar mazelas à visão, também a emissão de calor produzido expunha os utilizadores ao perigo de queimaduras e entre outras causas de carácter técnico e económico. Assim, criou-se um sistema seguro e atual, utilizando os meios existentes no simulador: o variador de velocidade. Sendo sabido que utiliza eletrónica de potência e é uma carga não linear, é expectável que produza tensões e correntes com uma componente harmónica capaz de ser estudada.

Para acrescentar mais um desafio, pretende-se variar a frequência de comutação do variador de velocidade. Quanto maior for a frequência de comutação, menor é a taxa de distorção

harmónica e o contrário também é verdade. Assim sendo, na consola do variador de velocidade, é possível alterar a frequência de comutação (parâmetro P0297), com 4 frequências definidas de 1,25 kHz, 2,5 kHz, 5 kHz e 10 kHz. É interessante comparar a taxa de distorção harmónica para cada frequência de comutação.

O guião para este trabalho encontra-se no anexo D.

## **5.5 RESUMO**

Como já foi dito, pretende-se que os guiões incluídos neste capítulo sirvam de base a docentes e alunos, mas, acima de tudo, motivar os responsáveis da Licenciatura e do Mestrado de Eletrotecnia - Sistemas Eléctricos de Energia a incentivar os docentes a utilizarem o simulador TERCO PST2200 em substituição do até aqui usado LEYBOLD, dando uso aos guiões elaborados nos anexos A, B, C e D.

Foram seleccionados quatro temas, no âmbito das unidades curriculares de SELE 1 e de SELE 2. Procurou-se incluir todas as funcionalidades do simulador, desde a produção da energia eléctrica, passando pela utilização dos modelos de linhas até à utilização das cargas. Pelo meio, ainda será possível incluir simulações de manobras nos trabalhos apresentados nos pontos 5.1, 5.2 e 5.3, que fazem parte deste capítulo.



## 6. Conclusões e trabalhos futuros

A conclusão mais relevante é a que se refere ao bom funcionamento do simulador. Este voltou a estar disponível para que as futuras gerações de alunos que irão passar pelo Laboratório de Sistemas de Energia possam beneficiar desta fantástica ferramenta de simulação.

As situações das avarias detetadas e corrigidas, apesar de à *posteriori* poderem deixar transmitir uma sensação de facilidade, principalmente para quem não acompanhou presencialmente este trabalho, revelou-se um processo, em muitos casos, bastante complexo.

Foi incluída uma nova funcionalidade no simulador: a medição de harmónicos à saída do variador de velocidade. Inicialmente, o cabo de alimentação trifásico de energia elétrica do motor que aciona o gerador, vinha diretamente do variador de velocidade. Atualmente, foram instalados 6 conectores (2 filas, com cada fila a ter 3 conectores). Nos 3 conectores superiores foram ligadas as três fases vindas do variador de velocidade e nos três conectores inferiores foram ligadas as três fases vindas do motor. Estes conectores estão acessíveis externamente, e têm de ser *shuntados* entre fases para fechar o circuito. É também aqui que se ligam os cabos do analisador de energia. A oportunidade desta situação acontece na sequência da avaria técnica no anterior trabalho utilizado para efetuar essa validação. Este trabalho ainda beneficiou da criação de um guião específico.

Aumentou-se a robustez e a fiabilidade do simulador com a substituição dos contactores e blocos de contactos auxiliares que, devido à sua fixação ao contactor, permitem atualmente um acoplamento mecânico mais robusto. E como os novos contactores Siemens são mais suaves a ligar e desligar, não provocam tantas vibrações, o que evita o desaperto precoce dos parafusos.

Ainda antes de iniciar este trabalho, já se tinha chegado à conclusão que este simulador era, e continua a ser, muito limitado na possibilidade da seleção de manobras a efetuar. Para aumentar as possibilidades, foram sugeridas uma gama alargada de alterações. Outras alterações também foram propostas noutras áreas, como a alteração das cargas resistivas, a

alteração ao modelo das linhas de transmissão, nomeadamente as duas que simulam o comprimento de linha de 100 km. Ainda foram propostas outras alterações de pormenor. Pode-se afirmar com toda a segurança que, se todas as sugestões forem implementadas, o simulador fica muito mais completo do que o modelo atualmente comercializado pela TERCO, que, pela consulta do catálogo atual, continua a comercializar um modelo semelhante ao do ISEP, com atualizações no que se refere às proteções, nos *displays* e no grafismo exterior.

Com vista a melhorar o equipamento, as melhorias sugeridas passam pela utilização do autómato da OMRON existente no simulador, com a finalidade de implementar um programa melhorado em relação ao que existe atualmente nas placas de controlo lógico. Como este autómato tem equipado uma porta de rede *ethernet*, existe a possibilidade de controlar o simulador remotamente.

No seguimento da implementação do autómato, o sistema SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) proporcionaria um ambiente gráfico próximo do que as grandes empresas que atuam no setor energético têm. O sistema SCADA permite receber e enviar informação para o autómato, criar um sinótico do simulador, pode ser configurado para criar alarmes específicos, criar relatórios e gráficos do histórico e outras funcionalidades que poderiam ser exploradas.

As sugestões mais básicas e de fácil implementação passariam por colocar um sistema de *by-pass* aos disjuntores do simulador porque, sempre que seja necessária uma intervenção aos disjuntores, esta ação obriga a cortar as cargas que lhe estão associadas. Outras alterações foram estudadas e apresentadas no ponto 4.3 com mais detalhe, que proporcionariam imensas vantagens.

Retirar as cargas resistivas atuais porque têm uma componente indutiva, e trocá-las por cargas puramente resistivas.

Calcular a capacidade dos condensadores adequados aos dois modelos das linhas de 100 km, situados no painel C4 com o objetivo de obter um modelo de linha o mais próximo possível da realidade, tendo de se ter em atenção os níveis de tensão adotados.

Adaptar todos os restantes guiões utilizados no simulador por módulos da LEYBOLD para o da TERCO PST2200, usados nas unidades curriculares de Sistemas Elétricos de Energia 1 e 2 (SELE 1 e SELE 2).

Afinar as proteções existentes para ultrapassar a limitação atual de 1,8 A da intensidade de corrente nas linhas e nos barramentos A e B. Pode ser atingido com segurança os 3,0 A.

No que se refere às proteções, seria interessante transferir as proteções para a célula da REN (Soutelo), que está equipada com uma tecnologia mais recente e as que estão no simulador, serem usadas como redundância.

Sugere-se a elaboração de um plano de manutenção para o simulador de modo a garantir uma maior durabilidade dos seus componentes, garantir a segurança da utilização por parte dos alunos, pois este simulador vai ser sujeito a um maior desgaste porque quem o vai utilizar vão ser os alunos.

Uma outra hipótese que poderá ser estudada a sua viabilidade, passa por reproduzir o simulador num programa de *software*. Utilizando o Matlab/ Simulink, poderá ser possível criar um ambiente gráfico semelhante ao simulador da TERCO, com todas as funções existentes e atribuir a todos os componente valores idênticos aos originais. Posteriormente, seria interessante efetuar as mesmas simulações e comparar os valores entre ambos.


## *Bibliografia*

- [1] POOLER, W. J. R. H., Electrical Power, 2ª ed. Bookboon.com, 2013, ISBN 978-87-403-0145-8
- [2] MELO, Pedro Sousa - Transformadores, ISEP, 2010/11
- [3] FRANCISCO, António, Motores Eléctricos, Edições Técnicas e Profissionais, 2008, ISBN 978-972-8480-19-6
- [4] GOMES, António Augusto Araújo - Aparelhagem de Seccionamento, Comando e Protecção de Média e Alta Tensão, ISEP, 2013
- [5] Decreto de Lei Nº 42895 de 31 de março de 1960, *Diário do Governo nº 75 1ª Série* - Lisboa: Ministério da Economia
- [6] NOGUEIRA, Teresa Alexandra - Subestações e Postos de Transformação, ISEP, 2012
- [7] DELGADO, Manuel - Sistemas Eléctricos Trifásicos - a Média, a Alta e Muito Alta Tensão, Publindústria, 2010, ISBN 978-972-8953-50-8
- [8] PAIVA, José Pedro Sucena, Redes de Energia Eléctrica - Uma Análise Sistémica, IST Press, 2005, ISBN 972-8469-34-9
- [9] GONÇALVES, Manuel João Dias - 1\_ANSEE\_INT\_MDGZAV, ISEP, 2013
- [10] MATIAS, José Vagos Carreira - Instalações Eléctricas 2 (de acordo com as RTIEBT), 1ª ed. Plátano Editora, 2013, ISBN 978-972-770-926-7
- [11] <https://www.tercosweden.com/products/electrical-power-systems/simulator-laboratory/>, acedido em: 19 de julho de 2016
- [12] <http://www.leybold-shop.com/catalog/product/view/id/9551/s/resistive-load-1-0-73310/category/5700/>, acedido em: 19 de julho de 2016
- [13] <http://www.mathworks.com/products/simpower/?requestedDomain=www.mathworks.com>, acedido em: 19 de julho de 2016
- [14] <http://www.mathworks.com/products/simpower/features.html#power-transmission> 7, acedido em: 19 de julho de 2016
- [15] <http://www.powerworld.com/products/simulator/overview>, acedido em: 20 de julho de 2016

- [16] <http://etap.com/power-system-monitoring-simulation/power-system-simulation-software.htm?lang=en-US>, acessado em: 20 de julho de 2016
- [17] <http://www.cyme.com>, acessado em: 20 de julho de 2016
- [18] <http://w3.siemens.com/smartgrid/global/en/products-systems-solutions/software-solutions/planning-data-management-software/planning-simulation/pages/pss-e.aspx>, acessado em: 20 de julho de 2016
- [19] PERFEITO, Joaquim Barreto Soares, Levantamento, reparação e beneficiação do simulador TERCO PST2200 do Laboratório de Sistemas de Energia do ISEP, Dissertação realizada no âmbito do Mestrado Sistema Elétrico de Energia ISEP, 2012
- [20] CARVALHO, José António Beleza de, Operação e Planeamento dos Sistemas Elétricos de Energia, ISEP, 2014
- [21] DIAS, Fernando Maurício, Qualidade da tensão, ISEP, abril 2014
- [22] GRIGSBY, Leonard L., Electric Power Generation, Transmission and Distribution, CRC Press, 2007, ISBN 978-0-8493-9292-4



# Anexo A. Guião "Verificação experimental do Efeito *Ferranti*"

 <b>DEE</b> Departamento de Engenharia Electrotécnica	ELETROTECNIA Sistemas Elétricos de Energia	DSEE
		001
Verificação experimental do Efeito <i>Ferranti</i> .		

## I. Objetivo do trabalho

Determinação experimental da tensão em vazio na receção de uma linha de transporte de energia elétrica de alta tensão.

## II. Procedimentos

1. Certificar-se de que no painel C1 as ligações de alimentação ao transformador de potência estão de acordo com o esquema apresentado na figura 1;
2. Com o auxílio dos condutores auxiliares, proceder à ligação de acordo com o esquema representado na figura 2;
3. Ligar os aparelhos de medição necessários;
4. No painel C1, para ligar o variador de velocidade, ligar o disjuntor CBM1 e, na consola, acionar o botão verde para colocar em marcha o motor.
5. No painel C1, dependendo da escolha de ter o sistema alimentado pela linha A, fechar o seccionador I1 ou pela linha B, fechar o seccionador I2. De seguida, ligar o disjuntor CB1.
6. No painel C3, e para a alimentação do modelo de linha, poder-se-á optar pela saída 1 ou pela saída 2. Se a escolha recair na saída 1, ligar o seccionador I5 ou I6 (confirmar a opção do ponto 6), fechar o seccionador I9 e por último ligar o disjuntor CB3. Se a escolha recair na saída 2, fechar o seccionador I7 ou I8 (novamente confirmar a opção do ponto 6), fechar o seccionador I10 e por último ligar o disjuntor CB4.
7. Excitar o gerador até que o voltímetro colocado no painel C1 (no início da linha)

atinga uma tensão composta de 120 V. **IMPORTANTE: Não ultrapassar a tensão máxima de 125 V, caso contrário, vão ser atuadas as proteções do simulador;**

8. Registrar os valores da tensão no início e no final da linha;
9. Retirar as conclusões.

### III. Registo de valores

**Tabela 1** - Registo de valores para o estudo do Efeito *Ferranti*.

	SIMULADOR	
	TENSÃO NO INÍCIO DA LINHA	TENSÃO NO FIM DA LINHA
COMPRIMENTO	U <sub>1</sub> (V)	U <sub>2</sub> (V)
km		
km		
km		

#### IV. Esquemas de ligações

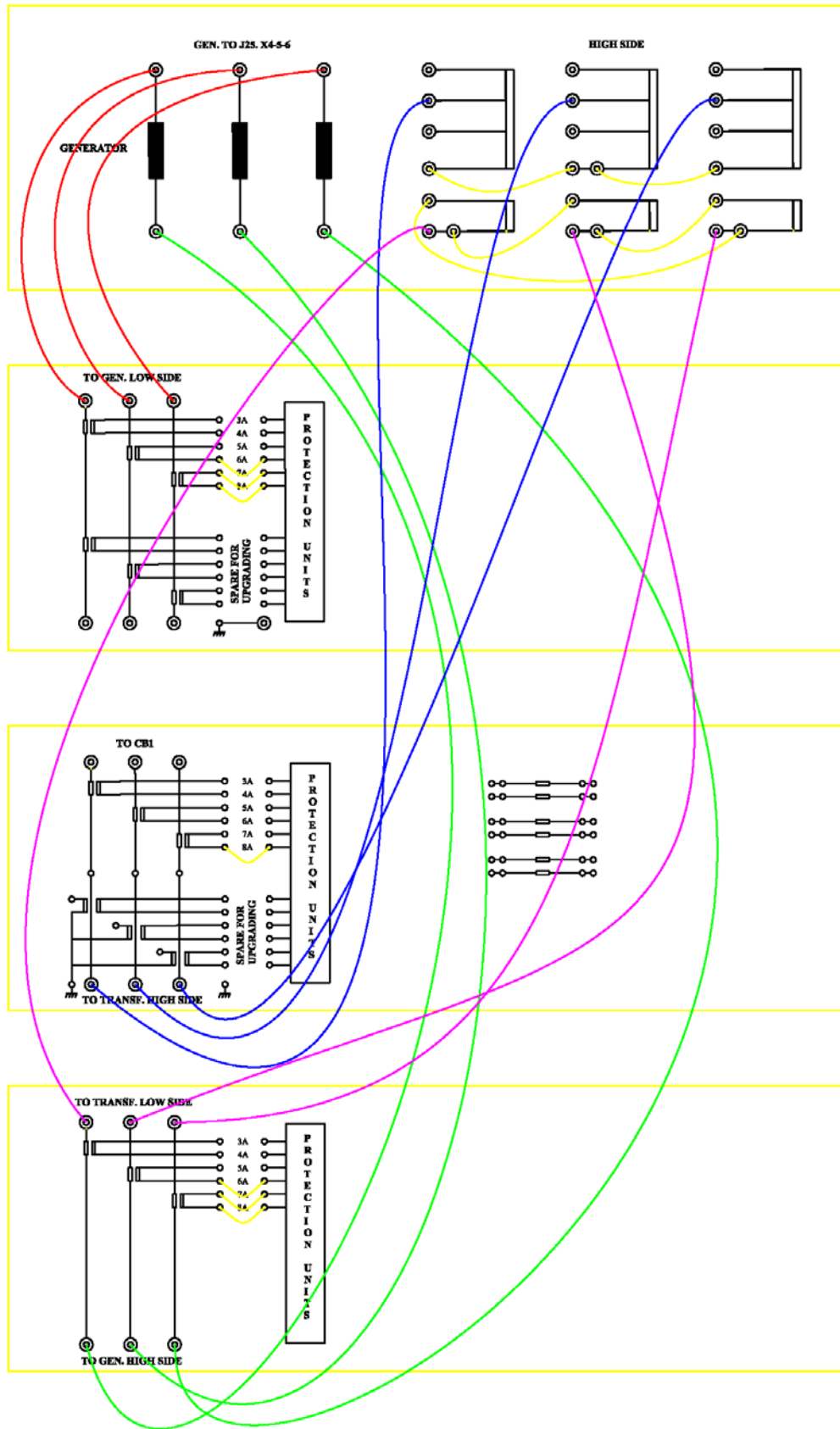
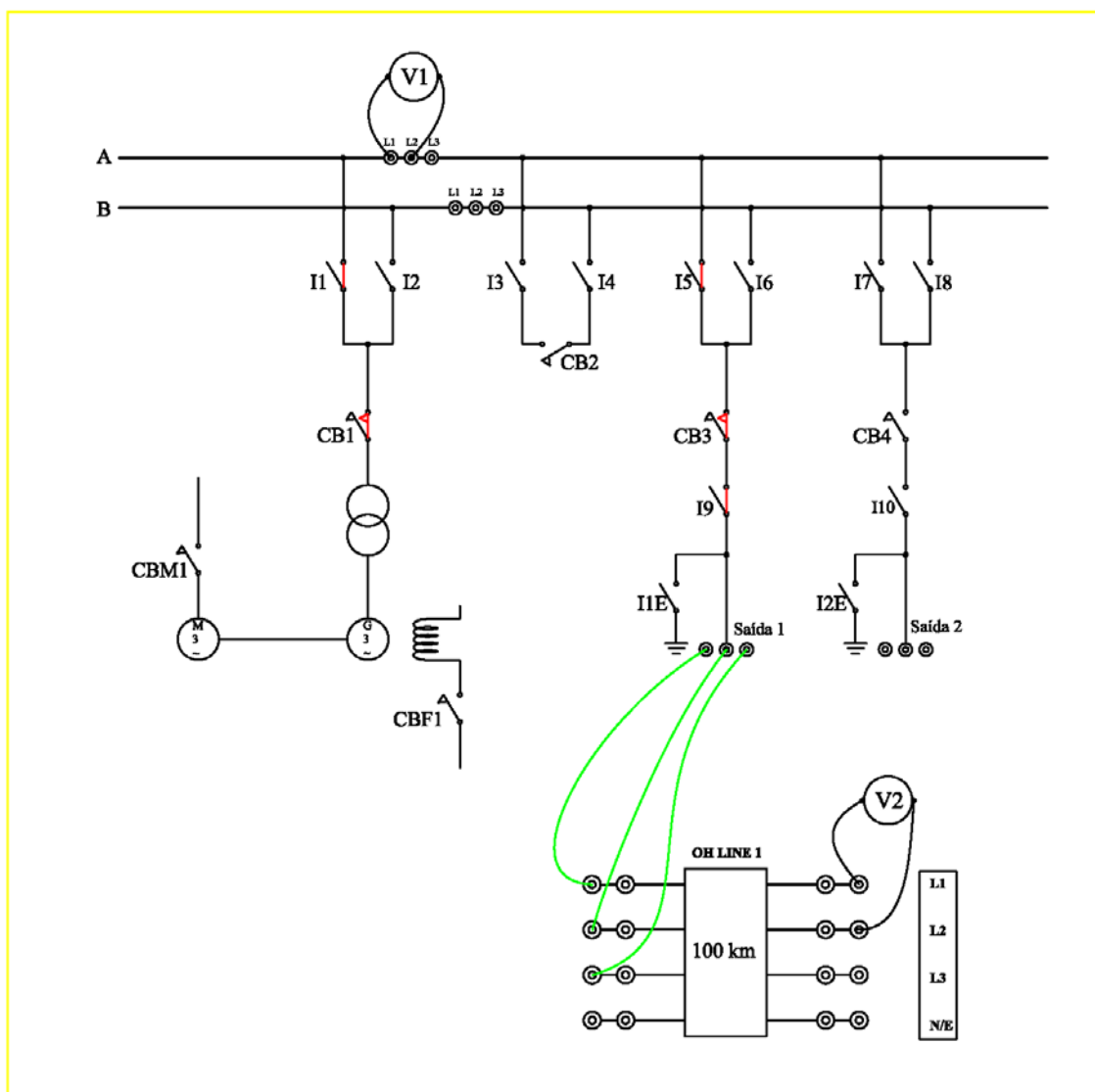


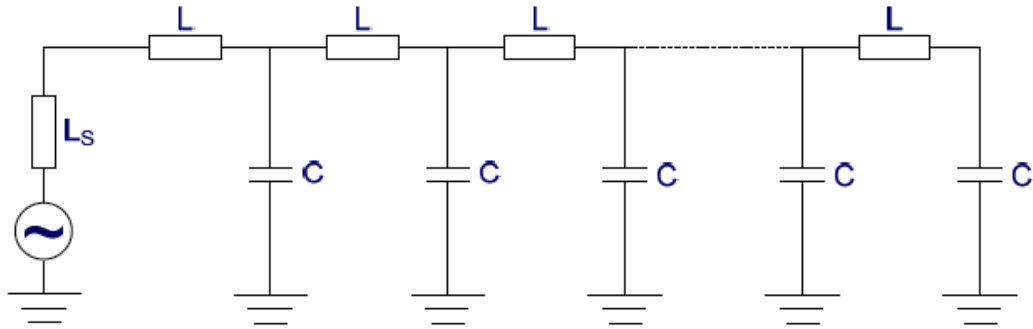
Figura 1 - Ligação do gerador ao transformador elevador.



**Figura 2** - Esquema de ligação para o estudo do Efeito *Ferranti*.

## V. Enquadramento teórico

O efeito *Ferranti* equivale ao funcionamento em vazio de uma linha comprida, quando é alimentada numa das extremidades e se encontra aberta na outra.



**Figura 3** - Representação de uma linha. [1]

A representação da linha, que se pode ver pela figura 3, é um elemento definido pelas suas constantes: indutâncias e capacidades, que podem ser imaginadas como constituído por uma ligação entre células elementares, isto é, capacidades em paralelo e indutâncias em série.

Cada célula estabelece um circuito ressonante, sendo o ganho ligeiramente superior à unidade. Quanto maior for o número de células, o que se traduz num comprimento de linha maior, maior será o ganho na sua extremidade. Assim a tensão será mais elevada no extremo da linha quanto maior for o comprimento desta.

Através das equações da linha considerada um quadripolo, sendo que estas equações resultam da equação dos telegrafistas,

$$\begin{aligned} V_x &= ch(\gamma x.V_0) - Z_o.sh(\gamma x.I_0) \\ I_x &= ch(\gamma x.I_0) - \frac{1}{Z_o}.sh(\gamma x.V_0) \end{aligned} \tag{1}$$

em que  $V$  e  $I$  são respetivamente a tensão e a intensidade de corrente no ponto de abcissa  $x$  de uma linha,  $V_0$  e  $I_0$  são seus valores na origem,  $Z_0$  é a impedância característica da linha e  $\gamma$  é a constante de propagação da linha.

Pelas equações seguintes os parâmetros da linha deduzem-se das suas características lineares,

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R+j.\omega.L}{G+j.\omega.C}} \quad (2)$$

$$\gamma = \sqrt{(R+j.\omega.L).(G+j.\omega.C)} \quad (3)$$

sendo R, L, G e C respetivamente a resistência, a indutância, a condutância que é nula numa linha aérea), a capacidade da linha e  $\omega = 2.\pi.f$  é a pulsação do regime sinusoidal observado.

No extremo da linha aberta ( $x = l$ ) a corrente é nula e obtém-se pela expressão:

$$ch(\gamma l.I_0) = \frac{1}{Z_0}.sh(\gamma l.V_0) \quad (4)$$

logo,

$$V_l = ch(\gamma l.I_0) - \frac{sh^2(\gamma l)}{ch(\gamma l)}.V_0 = \frac{1}{ch(\gamma l)}.V_0 \quad (5)$$

como  $\gamma.l$  são bastante pequenos, a expressão (5) pode-se limitar o seu desenvolvimento ao termo de segunda ordem, ficando assim:

$$V(l) = \left(1 + \frac{\gamma^2 l^2}{2}\right).V_0 \quad (6)$$

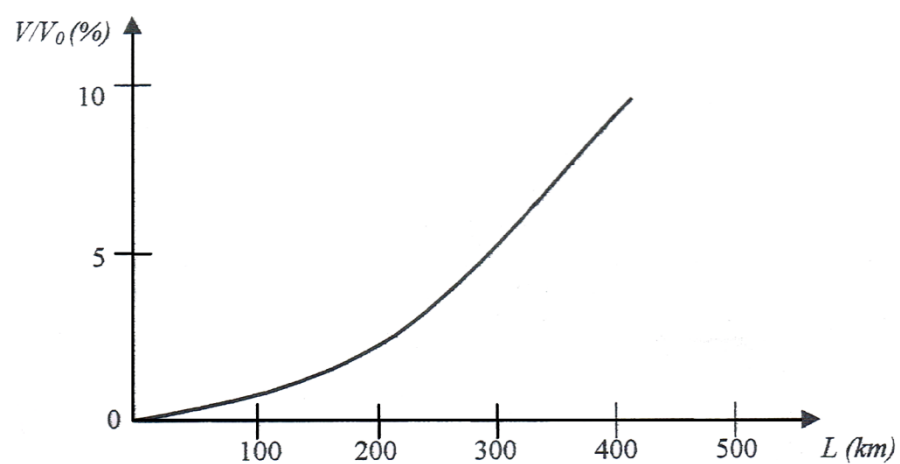
tendo em atenção a aproximação  $G = 0$  e R pequeno, fica:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (7)$$

$$\gamma = \frac{R}{Z_0} + j.\omega.\sqrt{L.C} \quad (8)$$

Por tudo o que foi apresentado, obtém-se a equação geral que traduz o aumento da tensão na extremidade de uma linha aberta que pode ser traduzida graficamente de acordo com o que é demonstrado pela figura 4: [2]

$$V = V_0(1 + 5,5.10^{-7}.l^2) \quad (9)$$




**Figura 4** - Representação do aumento da tensão na extremidade de uma linha aberta. [2]

## VI. Bibliografia

- [1] DIAS, Fernando Maurício, Qualidade da tensão, ISEP, abril 2014
- [2] DIAS, Fernando Maurício, Sobreensões, ISEP

# Anexo B. Guião "Sistema trifásico com cargas R, L e C"

 <b>DEE</b> Departamento de Engenharia Electrotécnica	ELETROTECNIA Sistemas Eléctricos de Energia	DSEE
		002
Sistema trifásico com cargas <b>R, L e C.</b>		

## I. Objetivos do trabalho

Estudo das tensões, correntes e potências de um sistema trifásico que alimenta, respetivamente, uma carga resistiva, indutiva e capacitiva.

## II. Procedimentos

1. Ligar o simulador Terco PST2200;
2. Com o auxílio dos condutores auxiliares, proceder à ligação de acordo com o esquema representado na figura 1 para uma carga resistiva, figura 2 para utilizar uma carga capacitiva e a figura 3 para uma carga indutiva. Configurar as proteções (painel C1) de acordo com a figura 4;
3. Ligar os aparelhos de medição necessários de acordo com os esquemas das figuras;
4. No painel C1, ligar o disjuntor CBM1 para ligar o variador de velocidade e neste, pulsar o botão verde para colocar em marcha o motor.
5. No painel C1, conforme a escolha de se alimentar o sistema pela linha A ou pela linha B, fechar o seccionador I1 ou o I2. O passo seguinte passa pela ligação do disjuntor CB1.
6. No painel C3, pode-se optar pela saída 1 ou pela saída 2. Se a escolha recair na saída 1, fechar o seccionador I5 ou I6 (confirmar a opção do ponto 6 relativamente à escolha da linha), fechar o seccionador I9 e por último ligar o disjuntor CB3. Se a escolha recair na saída 2, fechar o seccionador I7 ou I8 (confirmar a opção do ponto 6 relativamente à escolha da linha), fechar o seccionador I10 e por último ligar o disjuntor CB4.



7. Excitar o gerador até que o voltímetro colocado no painel C1 (no início da linha) atinja uma tensão composta de 150 V ou 220 V. **IMPORTANTE: Não ultrapassar a tensão máxima composta de 220 V, caso contrário vão ser atuadas as proteções do simulador;**
8. Começar pela carga resistiva e, no Seletor S1 aumentar a carga de acordo com o necessário, podendo esta variar entre 0 e 6 (na posição 0 corresponde à posição de desligada e o 6 corresponde ao máximo de carga). Para aumentar ainda mais o valor da carga, recorrer às cargas resistivas correspondentes ao Seletor S2.
9. Para as cargas capacitivas e indutivas, proceder do mesmo modo ao relatado no ponto 8.
10. Meça a tensão composta, intensidade de corrente, potência ativa e reativa no início da linha (aqui, para o registo das medições, utilizar o analisador de energia JANITZA, com a exceção da tensão) e a tensão, intensidade de corrente e fator de potência na carga.
11. Retirar as conclusões.

### III. Registo de valores

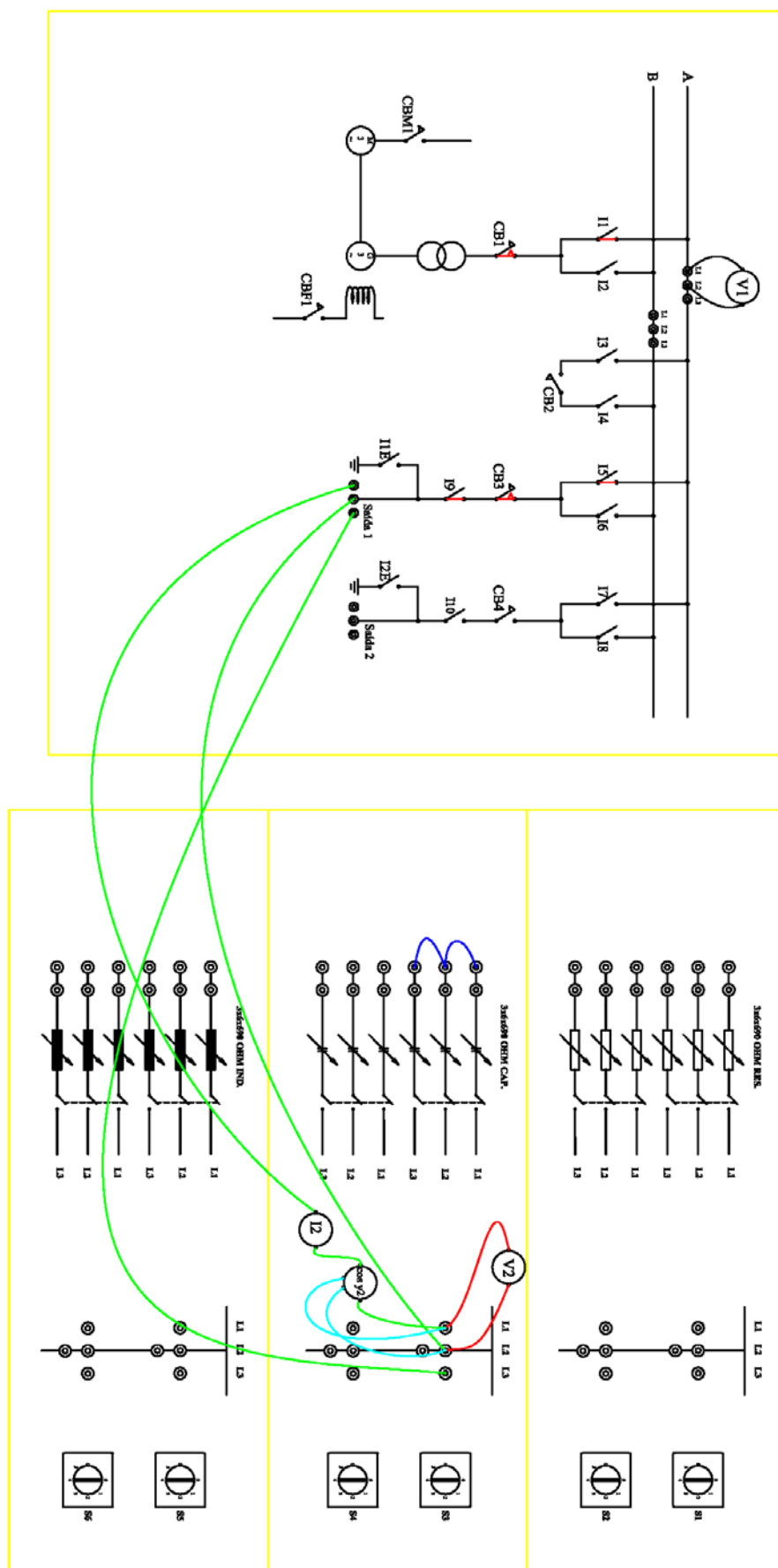
**Tabela 1** - Registo de valores para cargas R, L e C.

		LINHA				CARGA		
		U <sub>1</sub> (V)	I <sub>1</sub> (A)	P <sub>1</sub> (W)	Q <sub>2</sub> (VAr)	U <sub>2</sub> (V)	I <sub>2</sub> (A)	cos $\phi_2$
<b>R</b>	S1 - 4							
	S1 - 2							
<b>L</b>	S5 - 4							
	S5 - 2							
<b>C</b>	S3 - 4							
	S3 - 2							

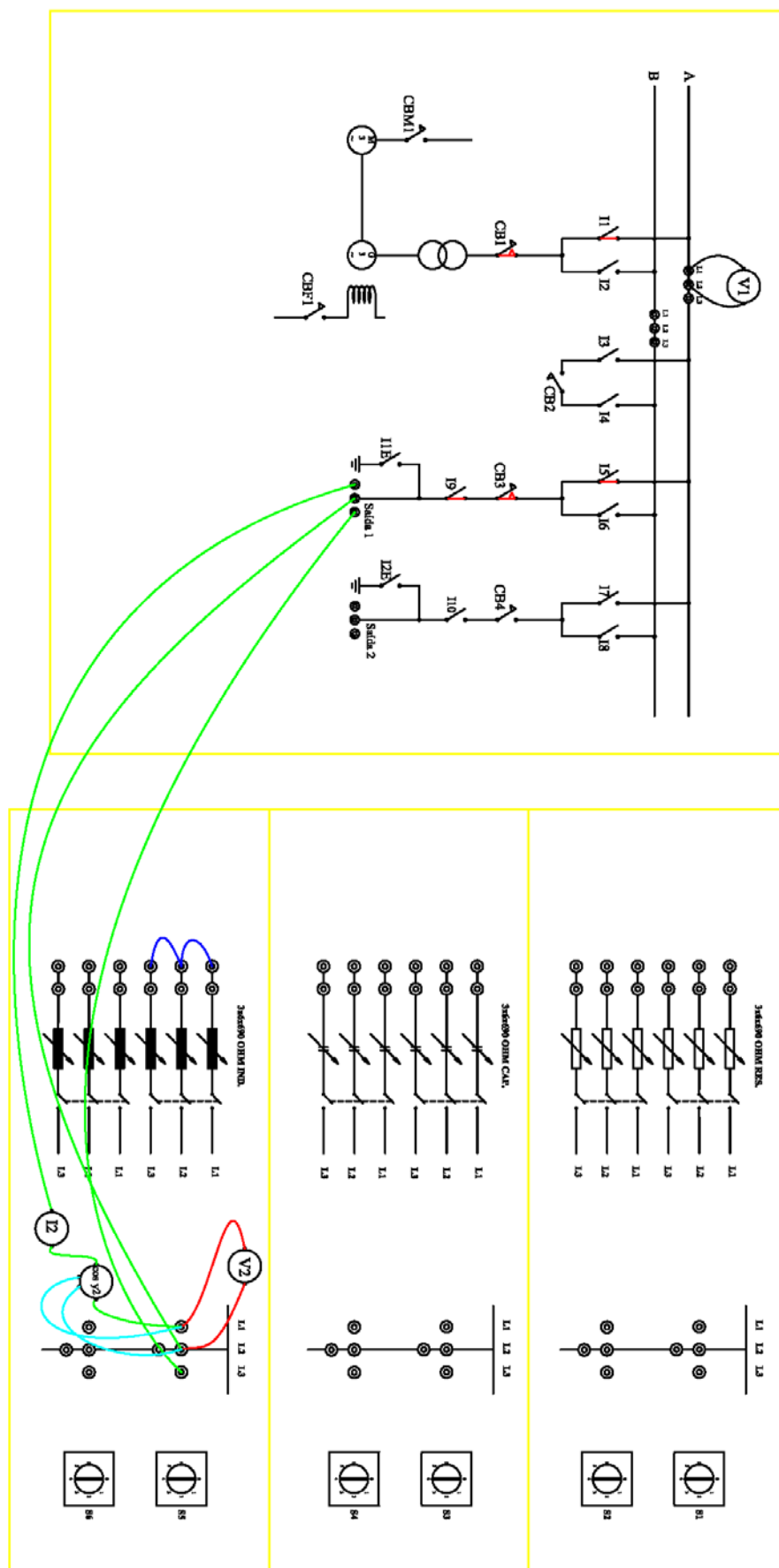
### IV. Análise

1. Analisar a variação da intensidade de corrente e tensão na linha e na carga;
2. Analisar a variação das potências ativa e reativa na linha e o sinal da potência reativa.

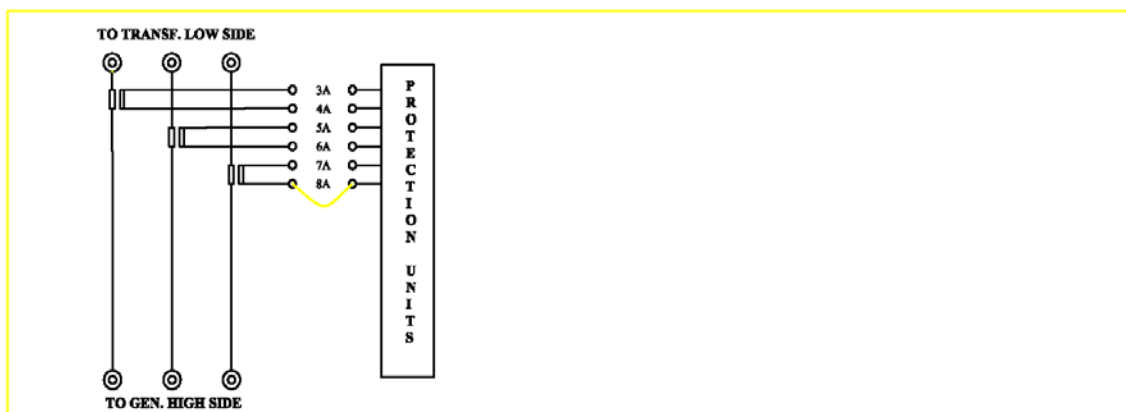
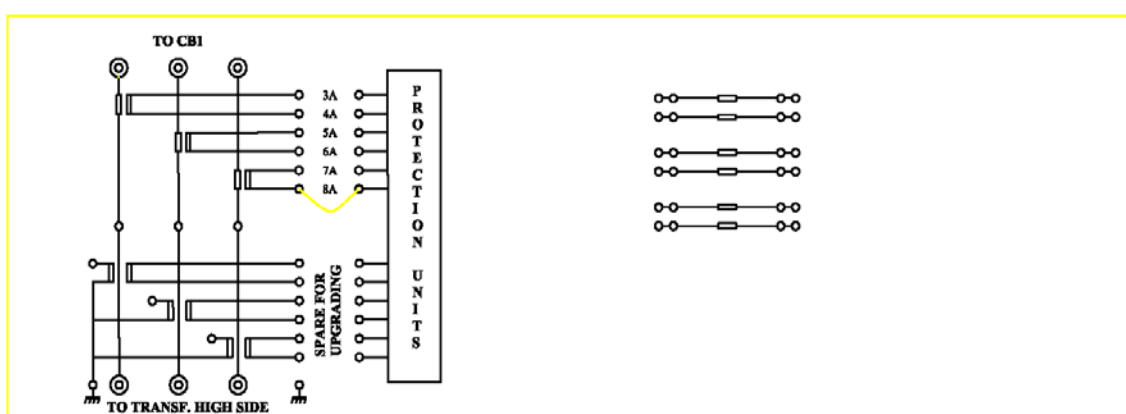
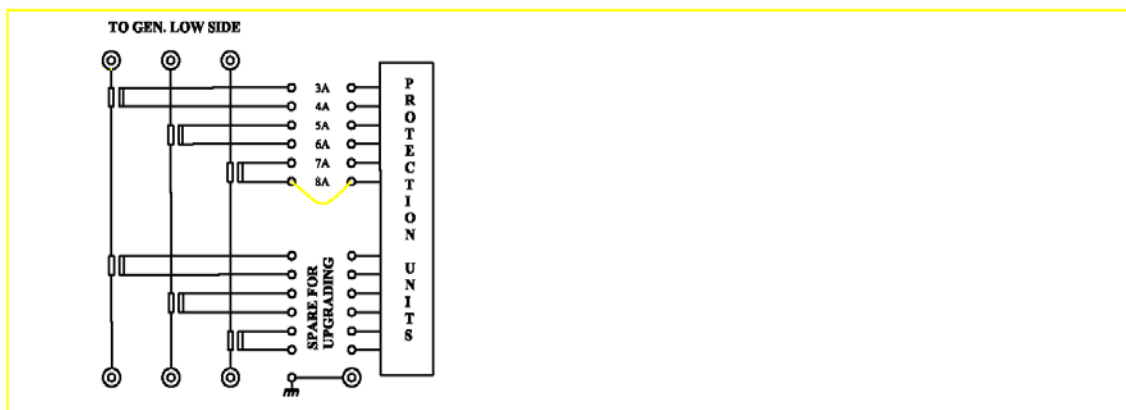




**Figura 2** - Esquema de ligação para carga capacitiva.



**Figura 3** - Esquema de ligação para carga indutiva.



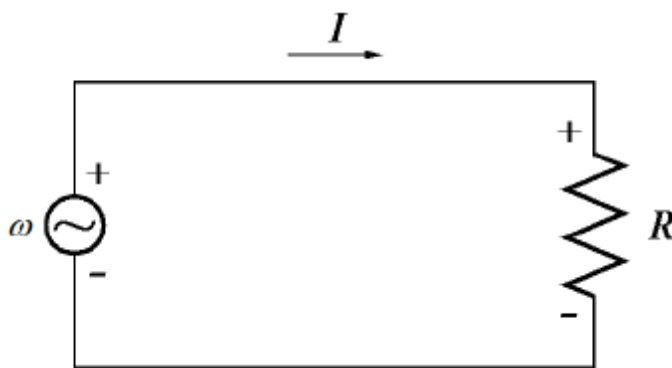
**Figura 4** - Configuração das proteções do painel C1.

## VI. Enquadramento teórico

Na prática é impossível obter circuitos de corrente alternada com características puramente resistivas, capacitivas ou indutivas. Mas vai-se fazer referência a estes casos ideais para se estudar o seu comportamento e obter bases para um melhor entendimento do guião em causa. Neste caso, vão ser utilizadas equações diferenciais. [1]

- Circuito puramente resistivo:

Submetendo uma resistência a uma fonte de tensão alternada da forma  $V = V_0 \cdot \cos(\omega.t + \delta)$ , conforme a figura 5 o demonstra:



**Figura 5** - Esquema elétrico de um circuito puramente resistivo. [2]

A intensidade de corrente que circula na resistência pode ser calculada pela lei de Ohm:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{V_0}{R} \cdot \cos(\omega.t + \delta) = I_0 \cdot \cos(\omega.t + \delta) \quad (1)$$

Observa-se que entre a tensão e a intensidade de corrente não existe diferença de fase entre ambas, como se representa na figura 6. A amplitude da intensidade de corrente,  $I_0$ , é dada simplesmente por  $V_0/R$ . A potência instantânea dissipada pela resistência é obtida por:

$$P = V \cdot I = \frac{V_0^2}{R} \cdot \cos^2(\omega.t + \delta) \quad (2)$$



**Figura 6** - Intensidade de corrente e tensão em fase.

O valor médio da potência dissipada num ou mais períodos completos é dado por:

$$P_{med} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \frac{V_0^2}{R} \cdot \cos^2(\omega \cdot t + \delta) dt = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_0^2}{R} \quad (3)$$

Na equação 3, T representa um ou mais períodos completos. Dessa equação pode-se constatar que a potência média é diferente de zero para qualquer valor  $\omega$ , isto é, qualquer que seja o valor da frequência, uma resistência dissipa a mesma potência elétrica num circuito onde a tensão e a intensidade de corrente variam no tempo.

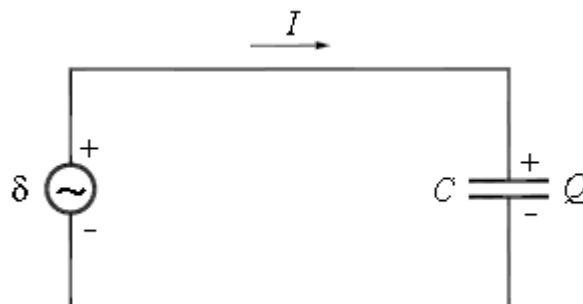
A impedância Z do circuito, em módulo, é dada pela razão dos valores de pico da tensão ( $V_0$ ) e pela intensidade de corrente ( $I_0$ ).

$$Z = \frac{V_0}{I_0} = R \quad (4)$$

Assim sendo, para este caso a impedância é simplesmente a resistência do circuito. [2]

- Circuito puramente capacitivo:

Na figura 7 é apresentado um condensador submetido a uma diferença de potencial V com  $V = V_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \delta)$ . A carga acumulada no condensador é  $Q = Q_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \delta)$ , em que  $Q_0 = C \cdot V_0$ .

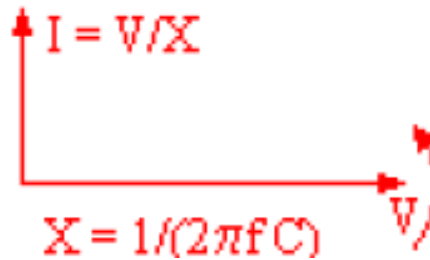


**Figura 7** - Esquema elétrico de um circuito puramente capacitivo. [2]

A intensidade de corrente que flui pelo circuito pode ser assim calculada:

$$I = \frac{dQ}{dt} = -\omega \cdot C \cdot V_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \delta) = I_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \delta + \frac{\pi}{2}) \quad (5)$$

Neste caso, pode-se ver que a tensão e a intensidade de corrente variam no tempo, mas estão desfasados 90°. Pode ser verificado pela figura 8.



**Figura 8** - Desfasamento entre a tensão e a intensidade de corrente.

Num circuito puramente capacitivo, a intensidade de corrente está adiantada em relação à tensão e tem amplitude dada por  $I_0 = \omega \cdot C \cdot V_0$ . É de salientar que esse comportamento já era esperado, pois assim que o condensador descarregado é ligado no circuito, a intensidade de corrente é máxima e a tensão é mínima. À medida que o tempo passa a intensidade de corrente diminui e a tensão aumenta (a carga vai sendo acumulada nas placas do condensador). Depois de um certo tempo, a intensidade de corrente passa por zero e a tensão é máxima (condensador carregado). A potência dissipada no circuito é dada por:

$$P = V \cdot I = -C \cdot V_0^2 \cdot \cos(\omega \cdot t + \delta) \cdot \sin(\omega \cdot t + \delta) \quad (6)$$

A potência média é:

$$P_{med} = C \cdot V_0^2 \cdot \frac{1}{T} \int_0^T \sin(\omega \cdot t + \delta) \cdot \cos(\omega \cdot t + \delta) dt = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V_0^2 \cdot \frac{1}{T} \int_0^T \sin(2 \cdot \omega \cdot t + 2\delta) dt = 0 \quad (7)$$

A potência média dissipada num circuito puramente capacitivo é sempre nula, qualquer que seja o valor de  $\omega$ . Por outras palavras, um condensador não dissipa potência. Ele armazena energia elétrica numa parte do ciclo para fornecê-la durante a outra parte.

A impedância do circuito, em módulo, é dada pela razão entre os valores máximos de tensão ( $V_0$ ) e de intensidade de corrente ( $I_0$ ), ou seja:



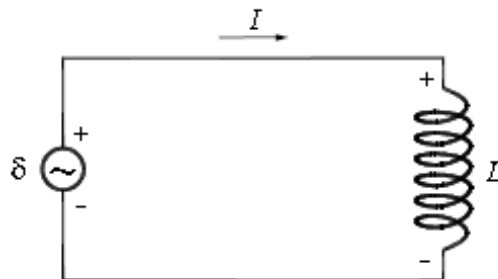
$$Z = X_c = \frac{V_0}{I_0} = \frac{1}{\omega \cdot C} \quad (8)$$

A impedância capacitiva (ou reatância capacitiva) é inversamente proporcional à frequência da tensão alternada. No limite da tensão contínua, vai até infinito, o que significa que não existe intensidade de corrente. Quando um condensador é ligado a uma fonte de corrente contínua, este carrega até atingir a tensão da fonte e a intensidade de corrente deixa de circular. [2]

- Circuito puramente indutivo:

É mostrado na figura 9 uma bobina submetida a uma força eletromotriz  $V$  com a forma  $V = V_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \delta)$ . A diferença de potencial que atua na bobina pode ser escrita como:

$$V = L \cdot \frac{dl}{dt} = V_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \delta) \quad (9)$$

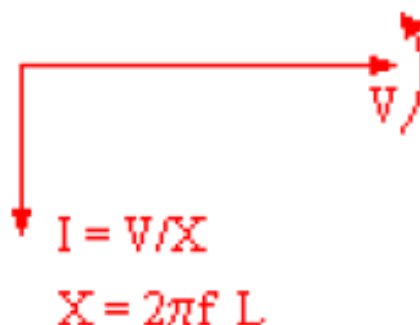


**Figura 9** - Esquema elétrico de um circuito puramente indutivo. [2]

A intensidade de corrente que passa através do circuito pode ser calculada por:

$$I = \frac{V_0}{L} \int \cos(\omega \cdot t + \delta) dt = \frac{V_0}{\omega \cdot L} \cdot \sin(\omega \cdot t + \delta) + C = I_0 \cdot \cos\left(\omega \cdot t + \delta - \frac{\pi}{2}\right) + C \quad (10)$$

A tensão e a intensidade de corrente variam periodicamente no tempo e estão desfasadas 90°. Neste caso, a intensidade de corrente está atrasada em relação à tensão, conforme se demonstra na figura 10.



**Figura 10** - Desfasamento entre a tensão e a intensidade de corrente.

Pode-se explicar tendo em atenção que a força contra-eletromotriz na bobina é proporcional à taxa de variação da intensidade de corrente no tempo (Lei de Faraday-Lenz). Quando a bobina é ligada ao circuito, ela comporta-se como um curto-circuito (desprezando o efeito resistivo) e a intensidade de corrente tende a aumentar rapidamente e imediatamente aparece uma tensão aos terminais da bobina (força contra-eletromotriz) de maneira a impedir que a intensidade de corrente se estabeleça. À medida que o tempo passa, a força eletromotriz da fonte faz com que a intensidade de corrente vá se constituindo de uma forma mais lenta e a tensão na bobina vai diminuir até que a intensidade de corrente atinja um valor de equilíbrio e a tensão aos terminais da bobina seja nula. O pico de tensão na bobina ocorre antes da intensidade de corrente máxima e, assim, a tensão está adianta em relação à intensidade de corrente.

Como no circuito puramente capacitivo, a potência média dissipada no circuito é nula para qualquer valor de  $\omega$ . A bobina armazena energia (na forma magnética) durante uma parte do ciclo e fornece essa mesma energia na outra parte do ciclo.

A impedância dum circuito é, em módulo, a razão entre  $V_0$  e  $I_0$ , isto é:

$$Z = X_L = \frac{V_0}{I_0} = \omega \cdot L \quad (11)$$

A impedância dum circuito puramente indutivo aumenta com a frequência e vai a zero em circuitos de corrente contínua. Como nesses circuitos a intensidade de corrente não varia, a tensão sobre a bobina é nula. [2]


Uma bobina real é composta por muitas voltas de fios enrolados e possui, além da indutância, uma resistência. Assim, é frequente afirmar-se que na prática, toda a indutância vem acompanhada por uma resistência. Porém, essa afirmação já não é totalmente

verdadeira, já que existem materiais, que sujeitos a baixas temperaturas podem atingir o estado de supercondutor e ter resistência elétrica nula. [1]

## **VII. Bibliografia**

- [1] REEVES, E. A., HEATHCOTE, Martin J., Eletrical Pocket Book, Newnes, 2003, ISBN 0-7506-4758-2
- [2] IFSC - Instituto Federal de Santa Catarina, Circuitos de Corrente Alternada I, Laboratórios de Eletricidade e Magnetismo, maio 2010

## Anexo C. Guião "Compensação do Fator de Potência num Sistema de Energia"

 <b>DEE</b> Departamento de Engenharia Electrotécnica	ELETROTECNIA Sistemas Elétricos de Energia	DSEE
		003
Compensação do Fator de Potência num Sistema de Energia.		

### I. Objetivos do trabalho

Analisar a necessidade da correção do fator de potência numa instalação elétrica trifásica e quais as consequências de não a corrigir, verificar o desfasamento entre a tensão e a intensidade de corrente e estudar os tipos de compensação do fator de potência.

### II. Procedimentos

Alimente a linha de transporte regulando a fonte de alimentação para 150 V ou 220 V. No fim da linha, ligar a carga em estrela e siga os pontos descritos:

1. Efetuar as ligações do painel C1, C3 e C10 conforme os esquemas elétricos que se encontram no ponto IV.
2. No seletor S1 e/ou S2 que se encontra no painel C10, correspondente à carga resistiva, regular para a posição descrita na tabela 1. Para seleccionar a carga capacitiva, escolher o valor de acordo com o que se pretende nos seletores S3 e/ou S4 (aqui deve-se ter em atenção à escolha do valor da carga, pois com o aumento desta, o valor da tensão vai aumentar bruscamente, o que origina a atuação das proteções contra sobretensões). Nos seletores S5 e/ou S6 é permitida a escolha das cargas indutivas.
3. Efetuar as ligações dos aparelhos de medição necessários.
4. Com o auxílio do aparelho de medição do fator de potência (fasímetro) ou de um analisador de energia portátil, e recordando que o valor do fator de potência ideal é igual a 1 (em vazio ou com cargas puramente resistivas), analisar os

valores medidos. De acordo com a situação simulada, efetuar a correção do fator de potência, aumentando ou diminuindo o valor da carga capacitiva ou indutiva.

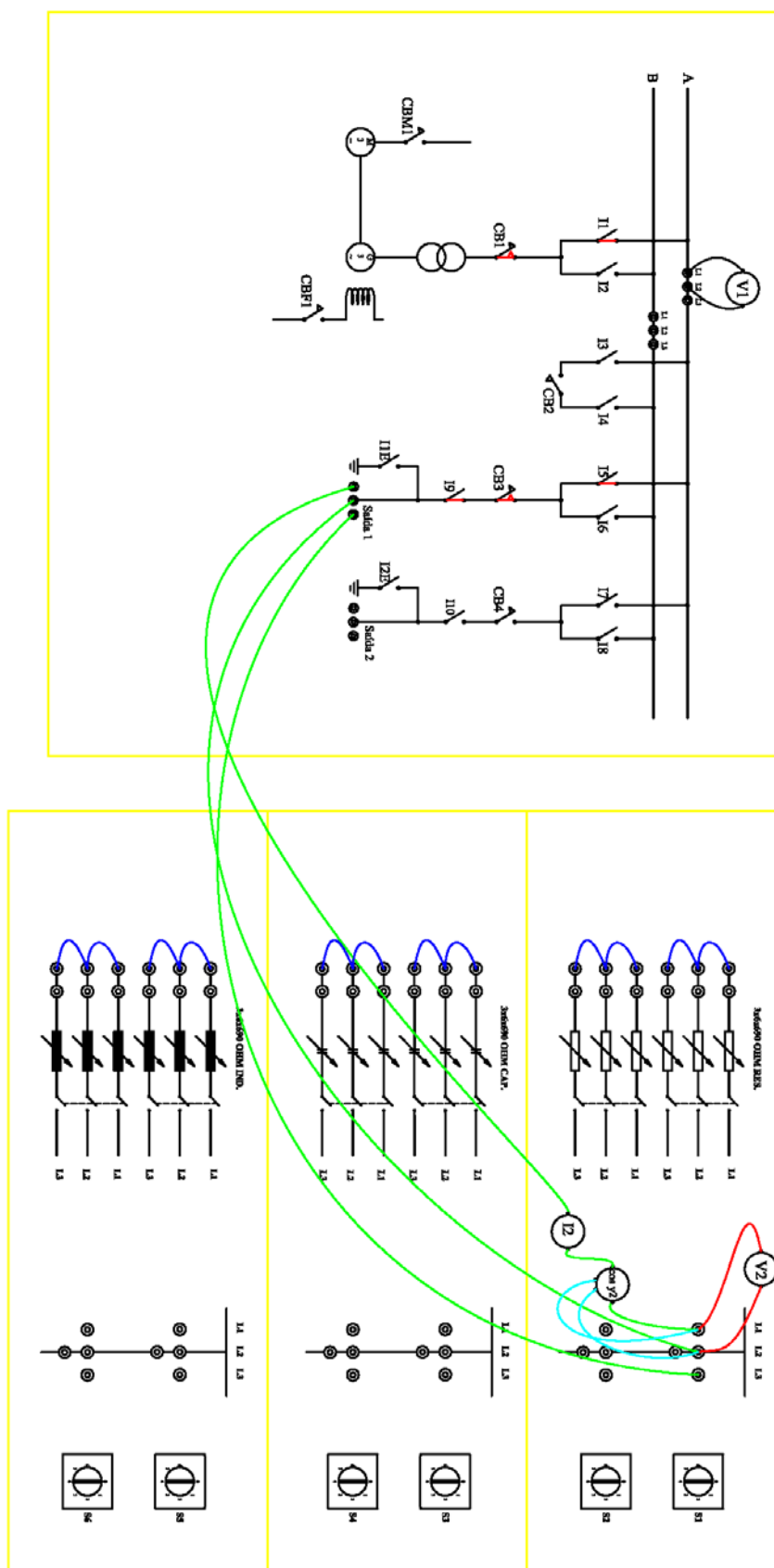
5. Medir a tensão composta, intensidade de corrente, potência ativa e reativa (utilizar os analisadores de energia JANITZA) no início da linha e a tensão, intensidade de corrente e fator de potência na carga para as situações anteriores.
6. Analisar o desfasamento da tensão em relação à corrente.

### III. Registo de valores

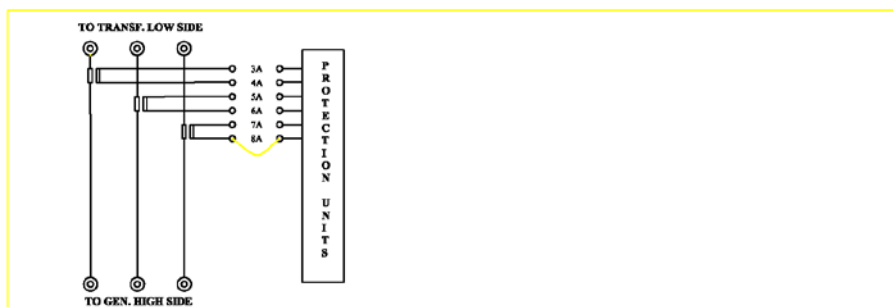
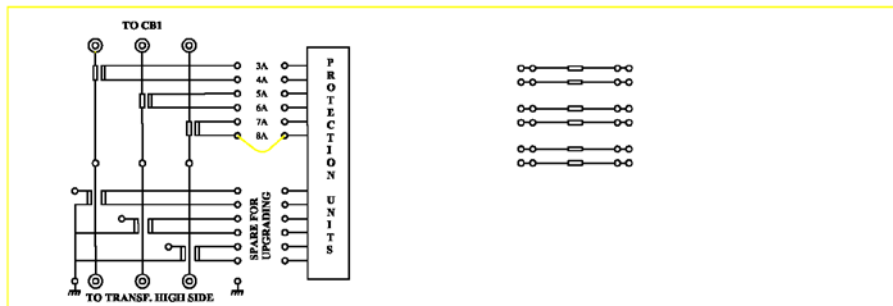
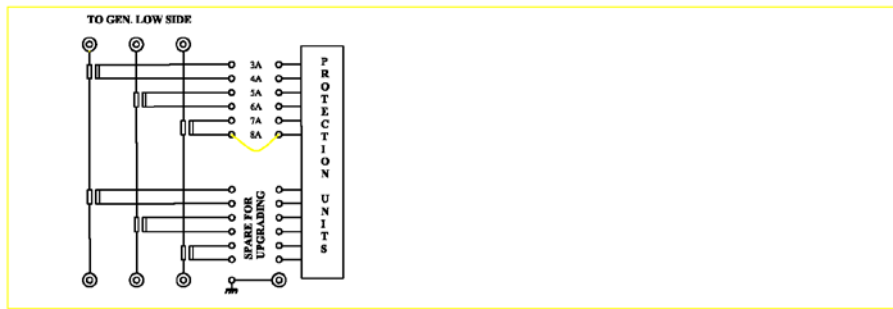
**Tabela 1** - Registo de valores para as situações simuladas.

<b>C</b> S3:3 ; S4:0		<b>LINHA</b>				<b>CARGA</b>		
		<b>U<sub>1</sub></b> (V)	<b>I<sub>1</sub></b> (A)	<b>P<sub>1</sub></b> (W)	<b>Q<sub>1</sub></b> (VAr)	<b>U<sub>2</sub></b> (V)	<b>I<sub>2</sub></b> (A)	<b>cos φ<sub>2</sub></b>
S1:3 ; S2:2	S3:2 ; S4:3							
S5:2 ; S6:3	S3:3 ; S4:1							
<b>C</b> S3:1 ; S4:1		<b>LINHA</b>				<b>CARGA</b>		
		<b>U<sub>1</sub></b> (V)	<b>I<sub>1</sub></b> (A)	<b>P<sub>1</sub></b> (W)	<b>Q<sub>1</sub></b> (VAr)	<b>U<sub>2</sub></b> (V)	<b>I<sub>2</sub></b> (A)	<b>cos φ<sub>2</sub></b>
S1:2 ; S2:1	S3:1 ; S4:1							
S5:5 ; S6:4	S3:0 ; S4:6							

#### IV. Esquemas de ligações



**Figura 1** - Esquema de ligação para a simulação da compensação do fator de potência.



**Figura 2** - Configuração das proteções do painel C1.

## V. Enquadramento teórico

Enquanto a energia ativa é necessária para produzir trabalho, por exemplo, a rotação do eixo do motor, a reativa é necessária para produzir o fluxo magnético indispensável ao funcionamento dos motores, transformadores, etc. No entanto, a energia reativa "ocupa espaço" no sistema que poderia ser usado por mais energia ativa, e aumenta as perdas nas redes de distribuição e nas instalações de utilização, pelo que deve ser controlado o seu consumo. [1]

O Fator de Potência representa o grau de eficiência do uso dos sistemas elétricos. Valores altos de fator de potência, próximos de 1,0 indicam uso eficiente da energia elétrica, enquanto valores baixos indicam o seu mau aproveitamento, além de representar uma sobrecarga para todo sistema elétrico.

Para cálculo da energia reativa a faturar, utiliza-se o fator  $\text{tg } \varphi$ , que é definida como o quociente entre a energia reativa e a energia ativa medidas no mesmo período. Quanto maior for  $\text{tg } \varphi$  menor será o Fator de Potência e maior será a energia reativa a percorrer as redes. [2]

A 1 de janeiro de 2011 entrou em vigor o escalão correspondente a  $\text{tg } \varphi \geq 0,5$  e em 1 de janeiro de 2012 o referente ao escalão  $0,3 \leq \text{tg } \varphi < 0,4$  e ainda a introdução do período de integração diário no cálculo (atualmente mensal) para os clientes MAT, AT e MT.

Os fatores multiplicativos aplicados ao preço de referência de energia reativa publicados pela Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE), por escalão de faturação de energia reativa indutiva são:

	Descrição	Fator multiplicativo
Escalão 1	Para $0,3 \leq \text{tg } \varphi < 0,4$	0,33 (a partir de 1.1.2012)
Escalão 2	Para $0,4 \leq \text{tg } \varphi < 0,5$	1,00
Escalão 3	Para $\text{tg } \varphi \geq 0,5$	3,00

\*Os clientes com contrato há menos de 8 meses estão isentos de pagamento de energia reativa.

**Figura 3** - Fatores por escalão da faturação de energia reativa indutiva. [2]

A compensação do fator de potência, consiste em, localmente, na própria instalação consumidora, “produzir” a potência reativa necessária ao funcionamento da mesma com um fator de potência “aceitável”. Em vez do termo “compensação”, também são utilizadas as designações, “correção” ou “melhoria”.



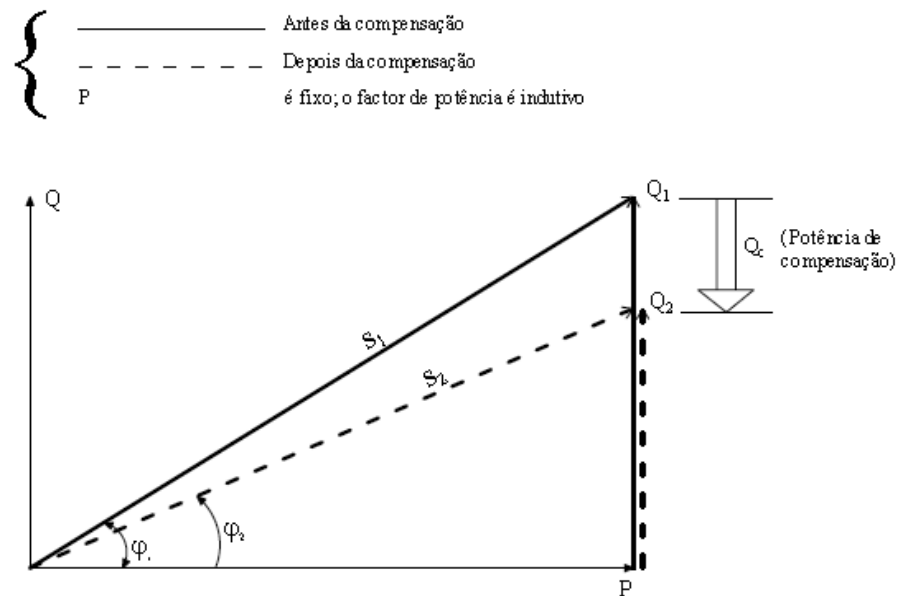
O investimento feito pelo consumidor, no equipamento de compensação, tem como contrapartida uma economia na fatura mensal de eletricidade. Assim, resulta que a escolha do tipo, e características, do equipamento de compensação, devem ser feitas com base num estudo económico. [3]

Existem, como se pode calcular, inconvenientes da energia reativa para as entidades envolvidas, tais como:

- Inconvenientes para o Produtor de Energia:
  - Instalação de alternadores de maior potência, logo mais caros;
  - Diminuição do rendimento e aumento das perdas dos alternadores;
  - Instalação de transformadores e aparelhagem de proteção, comando e manobra mais caros.
  
- Inconvenientes para o Transportador e Distribuidor de Energia:
  - Secção dos condutores das linhas e cabos mais elevada, tornando as instalações mais caras;
  - Postes e isoladores de apoio das linhas aéreas com maiores dimensões, logo mais caros;
  - Transformadores de maior potência, logo mais caros;
  - Aparelhagem de proteção, comando e manobra mais caros;
  - Quedas de tensão e perdas por efeitos de Joule nas linhas e cabos.
  
- Inconvenientes para o Consumidor:
  - Secções dos condutores mais elevadas;
  - Quedas de tensão e perdas mais elevadas;
  - Calibres superiores das aparelhagens de Proteção, Comando e Manobra;
  - Transformadores de maior potência, se estes existirem.

Seja a potência ativa  $P$  absorvida por uma carga e  $Q_1$  a potência reativa absorvida pela mesma, originando um fator de potência de  $\cos \varphi_1$  “não aceitável” para a instalação. A potência reativa absorvida deve ser reduzida para  $Q_2$  (supondo que  $P$  se mantém fixo), para que o fator de potência,  $\cos \varphi_2$ , seja considerado “aceitável”.

Usando a expressão  $Q = P \cdot \tan \varphi$ , podemos facilmente calcular a potência de compensação,  $Q_c$ . O diagrama vetorial apresentado na figura 4, ajuda ao entendimento da situação, sendo fácil de concluir que a potência de compensação é calculada pela expressão,  $Q_c = P (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$ . [3]



**Figura 4** - Representação gráfica da potência de compensação. [3]

#### a) Significado Físico da Potência Reativa

Dos conhecimentos adquiridos em eletromagnetismo, sabe-se que a energia armazenada no campo elétrico, no interior de um condensador, de capacidade  $C$ , submetido a uma tensão  $u_c$ , é dada por:

$$W_{elétrico} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot u_c^2 \quad (1)$$

Refere-se a uma evolução sinusoidal, no tempo, em fase com a tensão. O valor máximo dessa energia ( quando  $u_c = U_c^{\max}$  e  $U_c$  é o valor eficaz de  $u_c$ , sendo  $U_c = U_c^{\max}/\sqrt{2}$ ) é dada por:

$$W_{elétrico} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_c^{\max^2} = C \cdot U_c^2 \quad (2)$$

Por outro lado, a energia armazenada no campo magnético de uma bobina, de indutância  $L$ , percorrida pela corrente  $i$ , é dada por:

$$W_{\text{magnético}} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot i^2 \quad (3)$$

Trata-se de uma evolução sinusoidal, no tempo, em fase com a corrente. O valor máximo dessa energia (quando  $i = I^{\text{max}}$  e  $I$  é o valor eficaz de  $i$ , sendo  $I = I^{\text{max}}/\sqrt{2}$ ) é dada por:

$$W_{\text{magnético}} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^{\text{max}^2} = L \cdot I^2 \quad (4)$$

Considerando um circuito  $R, L, C$ , submetido à tensão  $U$  e percorrido pela corrente  $I$  (valores eficazes), podemos calcular a diferença entre aquelas duas energias,  $W_r$ , conforme se demonstra:

$$W_r = W_{\text{magnético}} - W_{\text{elétrico}} = L \cdot I^2 - C \cdot U_c^2 \quad (5)$$

Manipulando esta expressão, por forma a vir a obter a potência reativa, pode ser feita do seguinte modo, a partir da relação  $U_c = I / (\omega \cdot C)$  :

$$W_r = W_{\text{magnético}} - W_{\text{elétrico}} = L \cdot I^2 - C \cdot \left( \frac{I}{\omega \cdot C} \right)^2 \quad (6)$$

$$= I \cdot \left( L \cdot I - \frac{I}{\omega^2 \cdot C} \right) \quad (7)$$

$$= \frac{U}{Z} \cdot \left( L \cdot I - \frac{I}{\omega^2 \cdot C} \right) \quad (8)$$

$$= U \cdot I \cdot \left( \frac{L}{Z} - \frac{1}{\omega^2 \cdot C \cdot Z} \right) \quad (9)$$

$$= \frac{U \cdot I}{\omega} \cdot \left( \frac{\omega \cdot L}{Z} - \frac{1}{\omega \cdot C \cdot Z} \right) \quad (10)$$

$$= \frac{U \cdot I}{\omega} \cdot \left( \frac{\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}}{Z} \right) \quad (11)$$

$$= \frac{U.I}{\omega} \cdot \left( \frac{X}{Z} \right) \text{ em que } X \text{ é a reatância do circuito } R, L, C \quad (12)$$

$$= U.I. \cdot \sin \frac{\varphi}{\omega} \quad (13)$$

$$= \frac{Q}{\omega} \quad (14)$$

Então, pode-se escrever:

$$Q = \omega \cdot (W_{\text{magnético}} - W_{\text{elétrico}}) \quad (15)$$

Então, a potência reativa é proporcional à diferença entre as duas energias. Ela corresponde, então, a uma energia trocada entre a fonte e a carga (conjunto bobina e condensador). Em situação de ressonância ( $\omega.L = 1/(\omega.C)$ ), será  $W_{\text{magnético}} = W_{\text{elétrico}}$ , pelo que a fonte não necessita de trocar energia com o conjunto bobina e o condensador ( $Q = 0$ ). [3]

### 1) Onde efetuar a compensação do fator de potência

Dependendo das características da instalação e dos objetivos a alcançar, determina-se como efetuar a compensação do fator de potência da instalação. Os diversos aspetos a considerar são: o modo de distribuição da corrente elétrica, o regime de carga, o transformador, o aumento de tensão no final de linha, o custo da instalação destes equipamentos, etc.

Em termos gerais, a compensação de uma instalação pode ser efetuada de forma global, parcial, individual ou combinada:

- **Compensação global**

A bateria de condensadores é instalada à saída do transformador se a instalação for alimentada em MT ou do quadro geral se a instalação for alimentada em BT.

Utiliza-se nas grandes instalações elétricas, com um grande número de recetores de potências diferentes e regimes de utilização pouco uniformes. [4]



**Figura 5** - Compensação global. [4]

- **Compensação parcial**

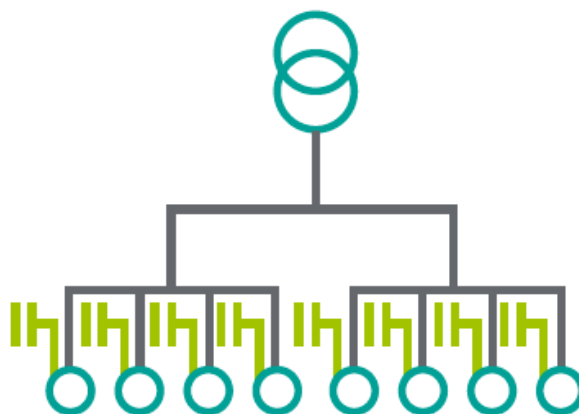
A bateria de condensadores é instalada de forma a compensar um setor, ou um conjunto de máquinas. É colocada junto ao quadro parcial que alimenta esses recetores. A potência necessária será menor que no caso da compensação individual, o que torna a instalação mais económica. [4]



**Figura 6** - Compensação parcial. [4]

- **Compensação individual**

É efetuada ligando os condensadores junto aos equipamentos cujo fator de potência se pretende melhorar. Do ponto de vista técnico representa a melhor solução. É uma solução mais cara do que as outras opções. [4]



**Figura 7** - Compensação individual. [4]

## **2) Bateria de condensadores de Compensação fixa e de compensação automática**

Em termos de equipamentos para a compensação de fator de potência, existem dois tipos:

- **Baterias de Condensadores de Capacidade Fixa:**

Os condensadores a utilizar nas baterias, têm potência unitária idêntica. Por norma, são modulares, podendo ser agregados, de forma a obter a potência reativa necessária de compensação.

Quando a bateria entra em funcionamento, é introduzida a totalidade da potência, não havendo a possibilidade de regular a mesma. A ligação/corte da bateria de condensadores pode ser feita:

- Por comando manual, mediante acionamento de um interruptor ou disjuntor;
- De forma semi-automática, através de um contactor, mediante uma ordem elétrica (através de um interruptor horário);
- De modo direto, quando o equipamento é ligado diretamente aos bornes de um recetor, em que a ligação/corte da bateria ocorre, necessariamente, quando se efetua a ligação/corte do recetor. [3]

- **Baterias de Condensadores de Regulação Automática:**


Possibilitam a adaptação automática da potência reativa fornecida pelo conjunto, a um perfil de fator de potência desejado. Este tipo de baterias é instalado, geralmente, à cabeça da instalação de distribuição BT, ou então num quadro parcial da mesma. As baterias de condensadores são divididas em escalões que são ligados e desligados de forma automática, em função dos valores da carga da instalação e do fator de potência.

Este processo é efetuado por um relé varimétrico. [4]

## **VI. Bibliografia**

- [1] GRIGSBY, Leonard L., Electric Power Generation, Transmission and Distribution, CRC Press, 2007, ISBN 978-0-8493-9292-4
- [2] <https://www.edp.pt/pt/empresas/informacoesuteis/Pages/novasRegrasEnergiaReativa.aspx>, acessado em: 25 de setembro de 2016
- [3] SANTOS, J. Neves dos, Compensação do fator de potência, FEUP, abril 2006
- [4] Compensação de fator de Potência, INDUSMELEC - Material Elétrico e Automatismos Industriais, julho 2013

# Anexo D. Guião "Medição das componentes Harmónicas das ondas de corrente e de tensão"

 <b>DEE</b> Departamento de Engenharia Electrotécnica	ELETROTECNIA Sistemas Eléctricos de Energia	DSEE
		004
Medição das componentes harmónicas das ondas de corrente e de tensão.		

## I. Objetivos do trabalho

Medição e verificação das componentes harmónicas das ondas de corrente e tensão num variador de velocidade, com o auxílio de um analisador de energia.

**Tabela 1** - Designação das componentes harmónicas.

<b>Frequência</b>	<b>Designação</b>
0 Hz	Componente continua DC
50 Hz	Frequência fundamental
100 Hz	2º harmónico ou de ordem 2
150 Hz	3º harmónico ou de ordem 3
200 Hz	4º harmónico ou de ordem 4
250 Hz	5º harmónico ou de ordem 5
300 Hz	6º harmónico ou de ordem 6
350 Hz	7º harmónico ou de ordem 7

## II. Procedimentos

1. No painel C1, encontram-se 6 conectores criados especificamente para a análise da componente harmónica conforme é demonstrado pela figura 1.





**Figura 1** - Local específico para a análise harmônica.

2. Retirar os ligadores em "U" e substituí-los por cabos identificados na figura 2 e ligá-los conforme o apresentado na figura 3a). É importante realçar o facto de que as ligações a efetuar terem de seguir exatamente o que é demonstrado na figura 3a), pois, caso contrário, na eventualidade de não ligar todos os cabos, o motor, que é controlado pelo variador de velocidade, não funciona. Chama-se à atenção que pode suceder um curto-circuito entre fases se, na altura da ligação, forem ligados os condutores conforme a figura 3b) o demonstra;



**Figura 2** - Cabos aconselhados para a experiência.

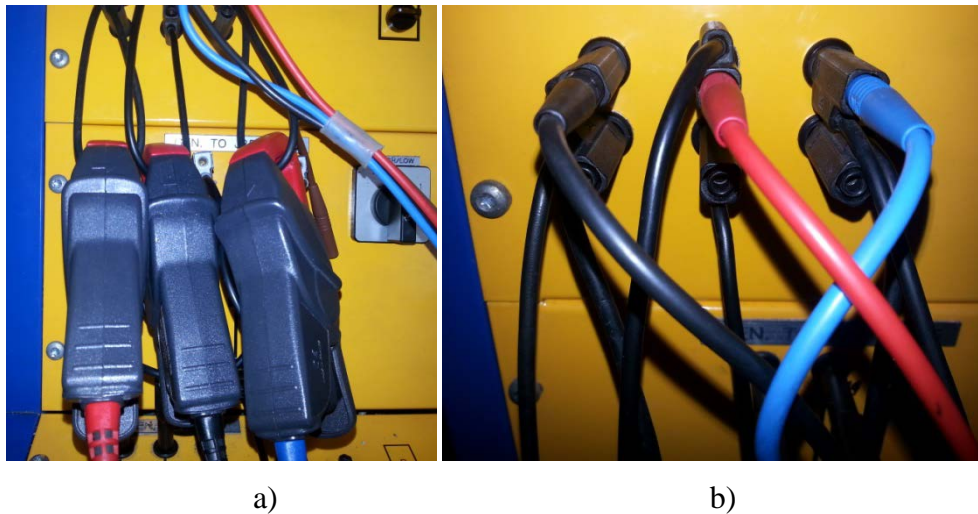


a)

b)

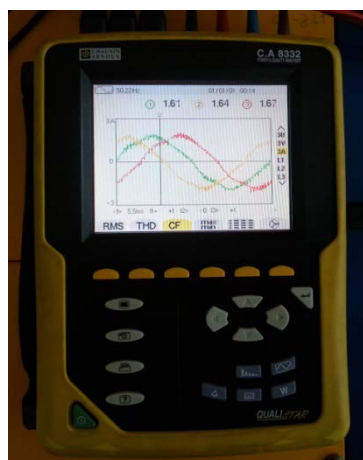
**Figura 3** - Ligação entre conectores a) de forma correta b) de forma incorreta.

3. Com o auxílio de um analisador de energia portátil, efetuar as ligações das pinças amperimétricas e os cabos de tensão, de acordo com a figura 4.



**Figura 4** - Ligação do analisador de energia a) pinças amperimétricas b) ligação da componente voltimétrica.

4. Ligar o variador de velocidade no botão CBM1 e ligar o motor no botão verde situado na consola do variador.
5. Acertar a velocidade de rotação do motor para que a frequência lida seja de 50 Hz (este valor é medido no analisador de energia portátil) ou para uma outra frequência escolhida.
6. Analisar, gravar e recolher os dados lidos no analisador de energia para o preenchimento das tabelas 2 e 3. Exemplo na figura 5 de uma simulação efetuada durante os testes.



**Figura 5** - Exemplo das ondas trifásicas de corrente, retiradas durante um dos testes efetuados.

7. É de extrema importância voltar à configuração inicial e, em caso de dúvida, consultar a figura 1.

Análise a distorção harmônica da corrente aos terminais do variador de velocidade e com o auxílio do analisador de energia e retire os valores necessários para o preenchimento da tabela 2.

**Tabela 2** - Registo de valores da intensidade de corrente.

INTENSIDADE DE CORRENTE I (A)								
HARMÓNICO	0	1	2	3	4	5	6	7
FREQUÊNCIA (Hz)								
VALOR EFICAZ								
PERCENTAGEM (%)								
DHT								

Análise a distorção harmônica da tensão aos terminais do variador de velocidade e com o auxílio do analisador de energia e retire os valores necessários para o preenchimento da tabela 3.

**Tabela 3** - Registo de valores da tensão.

TENSÃO (V)								
HARMÓNICO	0	1	2	3	4	5	6	7
FREQUÊNCIA (Hz)								
VALOR EFICAZ								
PERCENTAGEM (%)								
DHT								

### III. Análise

Analise a variação da intensidade de corrente e da tensão ao longo do tempo e faça um breve comentário acerca dos valores registados.

#### IV. Relatório

1. Refira quais os inconvenientes da presença de harmónicos numa instalação elétrica;
2. Explique a influência dos harmónicos no dimensionamento do condutor de neutro;

#### V. Enquadramento teórico

Qualquer forma de onda periódica pode ser decomposta, com base no Teorema de *Fourier*, numa soma de formas de onda sinusoidais, cada uma com a sua frequência, amplitude e fase. [1] Isto é, toda a função periódica  $Y(t)$  de frequência  $f$ , pode ser decomposta numa soma de sinusoides de frequência  $h * f$ , sendo  $h$  inteiro e  $h$  é a ordem harmónica ( $h \geq 1$ ).  $Y_0$  é o valor da componente contínua geralmente nula (valor médio). A componente de ordem 1 é a componente fundamental.

$$Y(t) = Y_0 + \sum_{h=1}^{\infty} Y_h \sqrt{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot h \cdot f + \varphi_0) \quad (1)$$

O valor eficaz é dado por:

$$Y_{ef} = \sqrt{Y_0^2 + Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 + \dots + Y_h^2 + \dots} \quad (2)$$

A Taxa Global de Distorção Harmónica (THD) como medida efetiva do seu valor de distorção harmónica verificada, resulta da expressão: [2]

$$THD = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} \left( \frac{Y_h}{Y_1} \right)^2} \quad (3)$$

##### 1) Tensão harmónica e Intensidade de Corrente harmónica

A THD da tensão traduz a deformação da onda de tensão e o método de cálculo é:

$$THD_U = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left( \frac{U_h}{U_1} \right)^2} \quad (4)$$

A THD da intensidade de corrente traduz a deformação da onda de tensão e o método de cálculo é:

$$THD_I = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \quad (5)$$

## 2) Efeitos dos harmónicos sobre os componentes dos sistemas eléctricos de energia

Os seus efeitos estão relacionados com os valores de pico (avaria dielétrica); valores eficazes (aquecimento suplementar) e ao espectro da frequência (vibração, fadiga mecânica e interferências eletromagnéticas) das tensões e da intensidade de corrente.

As suas consequências têm sempre um impacto económico, o que se traduz em custos adicionais ligados a:

- Uma redução do rendimento energético da instalação (perdas de energia);
- Um sobredimensionamento dos equipamentos;
- Uma perda de produtividade como por exemplo: envelhecimento acelerado dos equipamentos, paragens intempestivas, etc..

Os efeitos da poluição harmónica estão presentes quer ao nível das redes de distribuição de energia quer ao nível do funcionamento dos diferentes equipamentos dispersos pelo sistema. Assim, entre outros, os problemas que podem acontecer são a seguir enumerados:

### ➤ Máquinas eléctricas rotativas:

Os motores são sensíveis às perturbações na onda de tensão, isto é, quando uma onda de tensão distorcida excita um motor, altas frequências estão a ser injetadas no estator. Devido a este facto vão surgir harmónicos de corrente que podem causar inúmeros problemas como aquecimento, vibrações, binários pulsantes ou ruído. Por consequência, o aumento da temperatura dos motores vai diminuir o tempo de vida médio dos mesmos. Apresentando dois exemplos:

- Nos alternadores, os harmónicos de corrente provocam perdas óhmicas suplementares nos enrolamentos principais e nos enrolamentos amortecedores.

Por outro lado, a interação entre correntes harmônicas e o campo magnético fundamental pode originar binários oscilatórios que provocam vibrações no veio dos alternadores e consequentemente, o aumento da fadiga mecânica das máquinas;

- Nos motores assíncronos, ocorrem aumentos das perdas por efeito Joule, com o consequente sobreaquecimento dos enrolamentos estatóricos além de que, uma distribuição assimétrica da corrente induzida nas barras rotóricas provoca vibrações e o aparecimento de binários de torção no veio da máquina. [2]

➤ Disjuntores:

O corte das correntes com elevada taxa de distorção harmônica acarreta dificuldades acrescidas ao funcionamento dos disjuntores. As componentes de alta frequência têm uma variação mais rápida ( $di/dt$ ) na passagem por zero da corrente, o que dificulta o corte da corrente.

A produção suplementar de calor nos solenoides dos relés magnéticos em disjuntores magnetotérmicos, pelo motivo das frequências elevadas, podem diminuir até 20% o limiar de disparo destes aparelhos. [2]

➤ Condensadores:

Os condensadores são fortemente afetados pela poluição harmônica, visto a poluição ser dilatada devido à reatância capacitativa dos condensadores (reatância inversamente proporcional à frequência). Acontecem três tipos de problemas agrupados em sobrecargas de corrente, sobrecargas de potência e perigos de ressonância.

A tensão aplicada a uma bateria de condensadores de uma rede industrial onde exista sobreposição de várias frequências pode originar correntes de valores muito elevados, visto os condensadores possuírem uma impedância inversamente proporcional à frequência; correntes essas que podem ser várias vezes superiores à corrente nominal do condensador para a frequência fundamental. Visto os condensadores comerciais não suportarem correntes muito superiores à nominal, resulta daí um aquecimento excessivo destes componentes. [2]

➤ Sistemas de telecomunicações:

Os sistemas de telecomunicações são sistemas sensíveis quando os seus condutores são colocados na vizinhança de condutores de potência. Estes sistemas de telecomunicações irão sofrer interferências causadas pela irradiação de campos eletromagnéticos criados pelos harmónicos das redes de potência.

Os harmónicos da ordem nove até à vigésima ordem são particularmente problemáticos. Os harmónicos de ordem três e seus múltiplos, também são particularmente problemáticos caso exista o condutor neutro, visto este condutor ter maior exposição com os condutores de comunicações. Irão surgir efeitos parasitas que originam elevados níveis de ruído, ruídos estes que podem provocar uma má comunicação ou até mesmo falhas. [2]

➤ Transformadores:

Nos transformadores, os harmónicos de corrente provocam o aumento das perdas nos enrolamentos e os harmónicos de tensão criam correntes de *Foucault* e perdas histeréticas suplementares nos circuitos magnéticos. A possibilidade de ressonância entre as capacidades da rede e os enrolamentos do transformador com as suas indutâncias e capacidades distribuídas pode também ocorrer. Esta situação resulta numa redução da vida útil do transformador.

De referir que o sobreaquecimento causado pela presença de harmónicos, correntes de *Foucault* ou de remoinho, sendo proporcionais ao quadrado da frequência, obrigam à diminuição da potência estipulada (potência nominal) dos transformadores. [2]

➤ Linhas e cabos de transporte e distribuição:

As linhas e os cabos de energia registam perdas óhmicas suplementares dada a circulação de correntes harmónicas  $I_h$ . Além disso, devido ao efeito pelicular, a sua resistência para essas componentes varia de acordo com o harmónico ( $R_h = R \cdot \sqrt{h}$  - para componente de ordem  $h$ ). As perdas totais são dadas pela seguinte expressão:

$$\sum I_h^2 \cdot R_h \quad (6)$$

Nos cabos eléctricos trifásicos de BT, verifica-se um acréscimo das perdas no condutor de retorno (neutro) devido à eventual circulação dos harmónicos de corrente homopolar de 3ª ordem (múltiplos de três), acrescidos pelas perdas

dielétricas suplementares. Sendo as perdas dielétricas proporcionais à frequência, nota-se um acréscimo destas à medida que a ordem dos harmónicos aumenta. Devido à presença de tensões contínuas associadas a harmónicos pares, os cabos apresentam um desgaste mais acentuado. [2]

➤ Iluminação:

Observa-se uma redução da vida útil das lâmpadas e flutuação da intensidade luminosa (*flicker* – para o caso de ocorrência de sub-harmónicos).

O tempo de vida útil das lâmpadas de incandescência é fortemente reduzido (a redução pode atingir metade da vida útil se a taxa global de distorção harmónica for superior a 5%). No que diz respeito às lâmpadas de descarga referem-se o ruído audível e possíveis ressonâncias envolvendo as lâmpadas, balastros e condensadores usados na retificação do fator de potência. [2]

➤ Telecomando centralizado:

Os sistemas telecomandados centralmente por frequências musicais podem apresentar funcionamentos intempestivos totalmente indesejáveis. Surgem efeitos parasitas que podem provocar o funcionamento intempestivo de certos aparelhos. Por norma, estes sistemas são sintonizados para frequências diferentes dos harmónicos múltiplos da frequência fundamental, mas pode verificar-se uma atuação intempestiva para uma frequência próxima. [2]

➤ Classificação dos efeitos segundo a duração, que são divididos em duas categorias:

- Efeitos instantâneos ou de curta duração - A estes efeitos estão associadas falhas, mau funcionamento ou degradação do desempenho dos equipamentos e dispositivos devido à perda de sincronismo pela alteração da passagem por zero da onda de tensão.
- Efeitos de longa duração - São de natureza térmica e estão ligados, pelas perdas adicionais e sobreaquecimento, ao envelhecimento prematuro e mesmo à avaria de condensadores, transformadores e máquinas rotativas. [2]



## **VI. Bibliografia**

- [1] GRIGSBY, Leonard L., Electric Power Generation, Transmission and Distribution, CRC Press, 2007, ISBN 978-0-8493-9292-4
- [2] DIAS, Fernando Maurício, Qualidade da tensão, ISEP, abril 2014